



Machiel Building Solutions

Des façades-manteaux préfabriquées multifonctionnelles

Une technique innovante pour la rénovation

Août 2019



cstc.be
Recherche • Développe • Informe

Des façades-manteaux préfabriquées multi-fonctionnelles

Une technique innovante pour la rénovation

Août 2019

La présente monographie a été élaborée par le groupe de travail n° 130 *Industrialized multifunctional envelope systems* créé au sein du Comité technique 'Gros œuvre et entreprise générale' du CSTC. Le projet de recherche AIM-ES dont elle est issue a été subventionné par l'Institut bruxellois pour la recherche et l'innovation – InnovIRIS – dans le cadre de la plateforme multidisciplinaire *Brussels Retrofit XL*.

Les expériences et connaissances acquises, dans le cadre de la *Kennisplatform Renovatie*, avec les 'living labs' flamands *Mutatie+* et *Ecoren* – subventionnés par l'*Agentschap Innoveren & Ondernemen* (VLAIO) – ont également contribué à l'élaboration du présent document.

Auteurs

S. Dubois, O. Remy, M. de Bouw et Y. Vanhellemont

Composition du groupe de travail

B. Akkermans, S. Attia, B. Barend, K. Beeckmans, F. Blockx, W. Bosmans, M. Colson, Th. Compère, W. De Beukelaar, M. de Bouw, W. De Corte, K. De Vogelaere, A. Degelin, S. Dubois, A. Goidts, K. Maroy, H. Mostmans, A.-L. Nuytten, B. Parmentier, Cl. Pimpurniaux, P. Piroton, I. Rauch, O. Remy, L. Rollier, M. Steeman, N. Van Den Bossche, A. Verlinden, D. Versluys et M. Wagneur



CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION
CSTC, établissement reconnu en application de l'arrêté-loi du 30 janvier 1947
Siège social : Rue du Lombard 42 à 1000 Bruxelles

Publication à caractère scientifique visant à faire connaître les résultats des études et recherches menées dans le domaine de la construction en Belgique et à l'étranger.

La reproduction ou la traduction, même partielles, du texte de la présente monographie n'est autorisée qu'avec le consentement de l'éditeur responsable.

Acronymes

AHU	<i>Air Handling Unit</i>
AIM-ES	<i>Architectural Industrialized Multifunctional Envelope System</i>
BEHAM	<i>Building Element Heat, Air and Moisture</i>
CAO	Conception assistée par ordinateur
CNC	<i>Computer Numerical Control</i>
ECS	Eau chaude sanitaire
ETICS	<i>External Thermal Insulation Composite System</i>
FAO	Fabrication assistée par ordinateur
HVAC	<i>Heating, Ventilation and Air-Conditioning</i>
LCA	<i>Life Cycle Analysis</i> (analyse du cycle de vie – ACV)
LOS	<i>Line Of Sight</i>
MP	Mégapixels
NIT	Note d'information technique du CSTC
PEB	Directive sur la performance énergétique des bâtiments
PIV	Panneau d'isolation sous vide
PV	Photovoltaïque
TES	<i>Timber based Elements System</i> (système à structure en bois)

Sommaire

1. INTRODUCTION.....	5
1.1 Systèmes étudiés.....	6
1.2 Cas illustratifs.....	8
1.3 Organisation du document.....	8
2. PROGRAMMATION DU PROJET DE RÉNOVATION.....	10
2.1 Résumé.....	10
2.2 Facteurs à l'origine de la décision de rénover.....	10
2.3 Étude préliminaire du bâtiment.....	11
2.3.1 Définition du profil global du bâtiment.....	11
2.3.2 Prédiagnostic.....	12
2.4 Évaluation préalable de la stratégie de rénovation AIM-ES.....	13
2.4.1 Paramètres utiles pour évaluer la stratégie de rénovation AIM-ES.....	13
2.4.2 Outils complémentaires pour l'étude de faisabilité.....	17
2.4.3 Mise en place du projet.....	17
3. INVESTIGATION DU BÂTIMENT.....	18
3.1 Résumé.....	18
3.2 Analyse architecturale.....	19
3.2.1 Description détaillée du bâtiment.....	19
3.2.2 Étude géométrique.....	20
3.2.3 Étude des alentours du bâtiment.....	27
3.3 Évaluation de la performance et de l'état du bâtiment.....	28
3.3.1 Diagnostic de l'état du bâtiment.....	28
3.3.2 Évaluation de la performance énergétique générale.....	30
3.3.3 Évaluation de la sécurité et du confort des occupants.....	30
3.3.4 Étude de stabilité.....	31
3.3.5 Limites d'intervention et proposition de rénovation.....	33
3.4 Synthèse générale.....	33
4. CONCEPTION DES MODULES.....	35
4.1 Résumé.....	35
4.2 Exigences applicables à la conception.....	35
4.2.1 Hygrothermie.....	36
4.2.2 Acoustique.....	39
4.2.3 Sécurité incendie.....	41
4.3 Principe, forme et fonction des modules.....	45
4.3.1 Type de système.....	46
4.3.2 Paramètres géométriques.....	48
4.3.3 Extension du volume du bâtiment.....	50
4.4 Composition des modules couche par couche.....	52
4.4.1 Couche principale.....	52
4.4.2 Couche d'adaptation.....	54
4.4.3 Revêtement extérieur du module de façade.....	59
4.5 Systèmes et équipements intégrés aux modules.....	63
4.5.1 Châssis.....	63
4.5.2 Équipements techniques.....	66

4.6 Montage et jonction des modules	73
4.6.1 Remarques préalables	73
4.6.2 Charges à prendre en considération	74
4.6.3 Montage et reprise de charges	74
4.6.4 Types et distribution des dispositifs de liaison mécanique	75
4.6.5 Fixation à la structure du bâtiment	77
4.6.6 Remarques concernant les extensions du bâtiment	78
4.6.7 Jonction entre modules	78
4.6.8 Exemples de montage : études de cas européennes	79
5. RÉALISATION DES MODULES ET MONTAGE SUR CHANTIER	83
5.1 Résumé	83
5.2 En usine	83
5.2.1 Planning de fabrication	83
5.2.2 Prototypage	83
5.2.3 Fabrication	84
5.3 Sur chantier	86
5.3.1 Planification et coordination des interventions sur chantier	86
5.3.2 Dispositions pratiques relatives aux occupants pendant l'intervention	88
5.3.3 Préparation du bâtiment	88
5.3.4 Dispositions pratiques relatives à la protection contre l'humidité pendant l'assemblage	91
5.3.5 Montage des modules de façade	92
5.3.6 Travaux supplémentaires – Travaux de finition	96
6. EXPLOITATION DU BÂTIMENT RÉNOVÉ	97
6.1 Résumé	97
6.2 Réception des travaux	97
6.3 Monitoring	98
6.4 Mesures préventives et correctives	99
ANNEXE : ÉTUDES DE CAS	101
Augsburg (DE)	102
Berlin (DE)	103
Graz (AT)	104
Kapfenberg (AT)	105
Londres (UK)	106
Oulu (FIN)	107
Pettenbach (AT)	108
Riihimäki (FIN)	109
Roosendaal (NL)	110
Zurich (CH)	111
BIBLIOGRAPHIE	112
AUTRES RÉFÉRENCES UTILES	118

1. INTRODUCTION

L'évolution des processus et des équipements industriels à commandes numériques a donné le jour à des techniques innovantes applicables à la rénovation des ouvrages. Des éléments d'enveloppe préfabriqués peuvent désormais être assemblés en atelier, puis fixés à la structure existante d'un bâtiment, ce qui permet d'**accélérer le travail sur chantier**, tout en offrant une qualité accrue et de nombreuses possibilités architecturales.

Sous certaines conditions, **un bâtiment ancien peut être 'enveloppé' d'une nouvelle peau superposée aux murs existants** (figure 1), permettant ainsi d'éviter d'importantes nuisances au voisinage ainsi qu'aux occupants, qui peuvent continuer à utiliser leur lieu de vie quasiment sans restriction.

Lorsque les éléments de façade sont porteurs, la technique permet en outre d'accroître le volume du bâtiment, offrant des perspectives architecturales intéressantes et des possibilités de densification du bâti urbain (figure 2).

Enfin, **l'insertion d'équipements techniques** (conduits et systèmes HVAC, technologies solaires, protections solaires, etc.) à la surface ou au sein de la nouvelle enveloppe ouvre la voie à une approche plus intégrée de la rénovation grâce à des éléments de façade multifonctionnels.

Le projet AIM-ES

Le projet AIM-ES (*Architectural Industrialized Multifunctional Envelope System*) dont est issue la présente monographie a été mené dans le cadre de *Brussels Retrofit XL*. Cette plateforme multidisciplinaire rassemble treize équipes de recherche bruxelloises aux domaines d'expertise différents dans le secteur de la rénovation, et leur offre l'opportunité de valoriser leurs travaux. Au total, onze projets sont consacrés aux divers aspects de la rénovation du logement bruxellois.



Fig. 1 Éléments de façade rapportés sur un bâtiment existant.

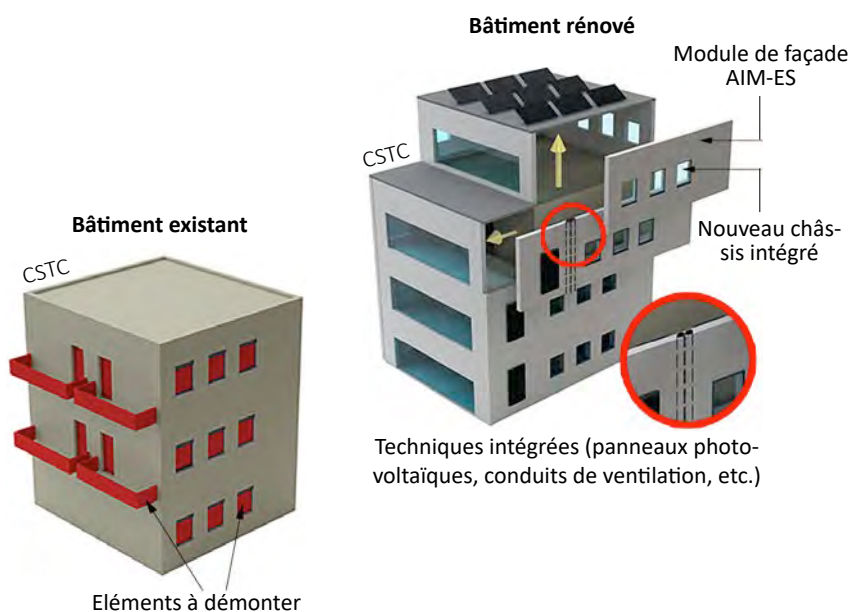


Fig. 2 Principe de la technique de rénovation AIM-ES.

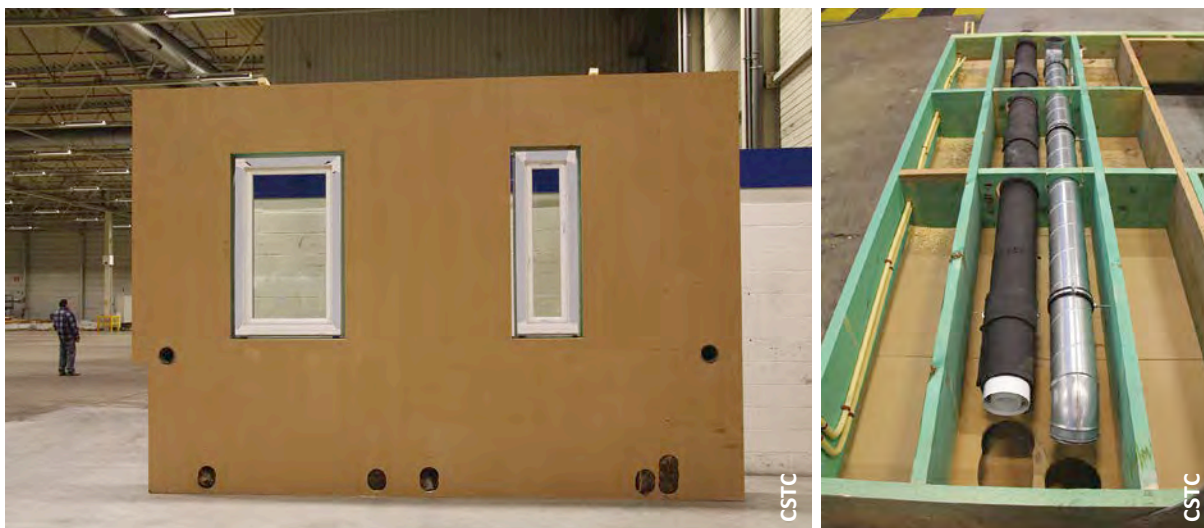


Fig. 3 Module ou élément AIM-ES assemblé en atelier, à gauche, et intégration de conduits de ventilation au sein d'un module, à droite.

Ces systèmes de façade préfabriqués superposés aux murs existants sont désignés, dans la suite du texte, par le sigle 'AIM-ES', en référence au projet de recherche dédié à la technique (voir l'encadré en page 5). Les éléments de façade qui composent de tels systèmes sont dénommés, quant à eux, modules AIM-ES ou éléments AIM-ES (figure 3).

Au cours des dernières décennies, des dizaines de bâtiments en Europe ont été rénovés en faisant appel à la technique AIM-ES. En parallèle, plusieurs projets de recherche novateurs ont amorcé la mise en contexte scientifique de cette technique en rassemblant l'ensemble des connaissances en la matière. En 2011, les projets 'IEA Annex 50' [60] et 'TES-EnergyFacade' [65] ont conduit à l'élaboration de documents de référence. Quantités d'informations relatives aux systèmes d'enveloppes préfabriqués destinés à la rénovation sont aujourd'hui disponibles sous forme de rapports, d'articles scientifiques ou de documentation technique. Plusieurs systèmes de modules – principalement à base de bois – ont désormais démontré tout leur potentiel : mise en œuvre rapide sur chantier, construction de qualité, rentabilité, fiabilité, etc.; mais ils restent peu répandus et peu connus, du moins en Belgique. Cette technique innovante pourrait cependant contribuer à stimuler les initiatives de rénovation dans notre pays. Le présent document tente de combler cette lacune en proposant, à l'intention des acteurs de la rénovation, des recommandations visant à encourager la mise sur pied de projets pilotes en Belgique.

1.1 SYSTÈMES ÉTUDIÉS

Les systèmes de façade étudiés ici associent trois démarches distinctes :

- la préfabrication d'éléments de façade de grandes dimensions
- leur mise en œuvre sur des murs existants
- l'intégration de menuiseries et/ou d'équipements techniques divers.

On se limite en outre aux systèmes offrant un certain degré de liberté architecturale; ceci implique au minimum :

- une capacité d'adaptation à divers types de bâtiments
- une vaste gamme de choix en ce qui concerne la couche de finition extérieure
- la possibilité d'utiliser les éléments préfabriqués pour accroître le volume du bâtiment.

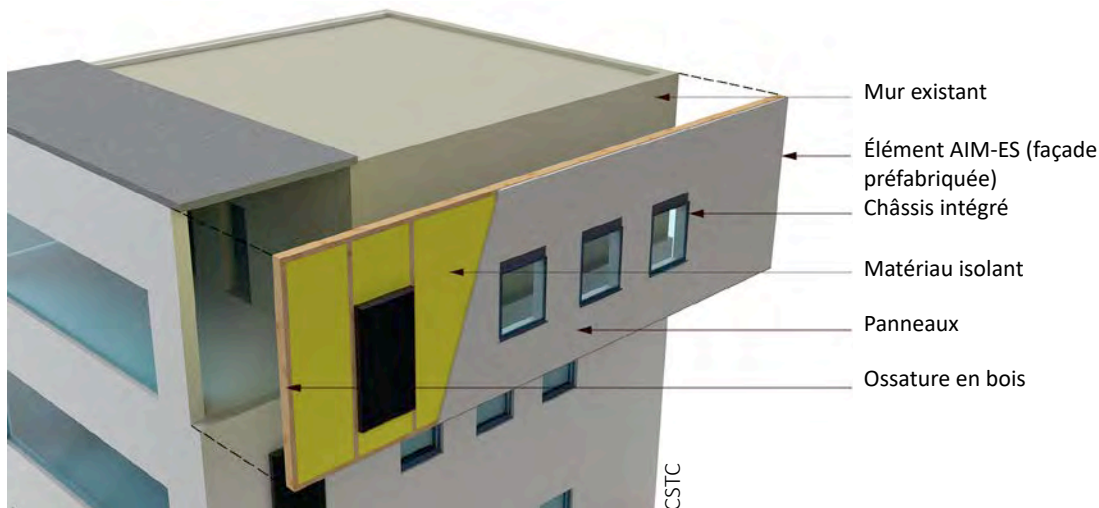


Fig. 4 Principe d'un système d'enveloppe horizontale de grandes dimensions à base de bois appliqué sur un mur existant.

Plusieurs systèmes, qu'ils soient commerciaux ou issus d'une recherche, ont été développés en Europe et sont décrits en détail dans la littérature. Les **modules de grandes dimensions à ossature en bois** (figure 4) répondent aux critères énumérés ci-avant et peuvent contribuer à une rapide diffusion de la préfabrication dans les projets de rénovation. Ils reposent sur des techniques simples, maîtrisées par un grand nombre d'entreprises en Belgique. Leur poids permet par ailleurs d'accroître facilement le volume de la construction sans nécessiter d'opérations complexes tant au niveau de la conception que de la mise en œuvre.

De multiples études de cas peuvent également aider les acteurs dans leur processus de conception. Si le présent document met l'accent sur les éléments à base de bois, ce choix se justifie surtout par la **nécessité de disposer d'une base scientifique et expérimentale pour rédiger ce guide**. Il convient néanmoins de préciser que d'autres solutions innovantes existent ou sont en cours de développement (structures en béton ou en acier, panneaux composites, etc.).

Le projet 'TES-EnergyFacade' fournit quantité d'informations techniques sur les systèmes de façade préfabriqués à base de bois [65]. **Seuls sont abordés ici les systèmes TES rapportés sur des murs existants** (éventuellement après enlèvement d'anciennes couches non structurales) et plus précisément deux types particuliers de modules de façade, à savoir :

- le système TES fermé des deux côtés par des panneaux de revêtement (figure 5) et dont la couche d'isolation principale est généralement appliquée en usine
- le système TES ouvert (figure 6) sans panneaux de revêtement à l'arrière (côté face au mur existant), dont l'isolation est injectée *in situ* dans des orifices préforés en usine.



Fig. 5 Rénovation de maisons de rangée, à Roosendaal, à l'aide d'un système TES fermé.



Fig. 6 Rénovation d'un immeuble à appartements, à Berlin, à l'aide d'un système TES ouvert [80].

Ces différents principes de conception sont décrits en détail au § 4.3.1 (p. 46).

1.2 CAS ILLUSTRATIFS

Ce document fait régulièrement référence à une série de projets de rénovation réalisés en Europe (indiqués en caractères soulignés) dans lesquels ont été mises en œuvre des solutions AIM-ES appropriées aux caractéristiques du bâtiment et qui permettront de dégager des perspectives de bonnes pratiques en matière de conception et de mise en œuvre sur chantier.

L'échantillonnage retenu reflète la diversité des immeubles d'habitation susceptibles d'être rénovés au moyen d'éléments AIM-ES. Dans le cas où les projets étaient similaires, nous avons privilégié ceux pour lesquels nous disposons d'une documentation technique fouillée (plans et schémas détaillés, équipements HVAC, types d'engins utilisés pour la fixation des modules, etc.). Une description détaillée des différents projets est fournie en [Annexe](#).

1.3 ORGANISATION DU DOCUMENT

Le texte s'articule autour des différentes phases d'un projet de rénovation tel qu'il devrait être mené dans des conditions idéales (figure 7) :

- la **phase de programmation**, qui va du démarrage du projet, avec la définition d'objectifs clairs respectant les souhaits du propriétaire, jusqu'à la planification et à l'organisation des phases suivantes. Une première étude de faisabilité fondée sur une évaluation préliminaire du bâtiment permet d'établir si le recours aux modules de façade industrialisés se justifie ou pas
- les **phases d'investigation et de conception**, deux étapes indissociables dans la mesure où l'étude approfondie du bâtiment est cruciale pour identifier les contraintes de conception dont découleront les choix techniques
- la **phase d'exécution**, qui comprend des étapes en usine et sur chantier. Les opérations en usine incluent la préfabrication des modules sur la base d'un modèle de production. Les travaux sur chantier comprennent toutes les tâches liées à la préparation du site et aux interventions sur le bâtiment et aux abords de celui-ci
- la **phase d'exploitation**, qui regroupe les actions préventives et correctives qui suivent l'exécution et garantissent la conformité du bâtiment aux performances prévues.

Le présent guide est conçu pour donner un aperçu général du processus de rénovation au moyen d'éléments de façade préfabriqués. Toutefois, vu l'abondance de la littérature en la matière, les auteurs se sont efforcés de compléter et d'adapter les informations au contexte belge. L'accent est mis plus particulièrement sur les liens entre l'étude du bâtiment, la concep-



Fig. 7 Les différentes étapes d'un projet de rénovation, depuis la programmation jusqu'à l'exploitation [64].

Lattke et al.

tion de la solution adaptée et ses conséquences pour l'exécution. Si la préfabrication offre l'avantage d'accélérer la mise en œuvre par rapport aux techniques d'isolation traditionnellement utilisées en rénovation (ETICS, par exemple), elle laisse par contre moins de place à l'improvisation sur chantier. Il est donc essentiel de connaître le bâtiment en détail, tant dans sa conception originale que dans sa situation existante. Les études menées en phase d'investigation mettront en évidence des contraintes qui orienteront le concepteur vers des solutions techniques spécifiques. La conception des modules de façade conditionnera, quant à elle, les interventions sur chantier. Ainsi, par exemple, le choix des équipements à intégrer dans les modules (groupes de ventilation décentralisés, etc.) pourra nécessiter des interventions supplémentaires sur chantier (perçements dans les murs existants pour le passage des conduits, par exemple).

La figure 8 présente la structure du document et les liens entre les différents chapitres.

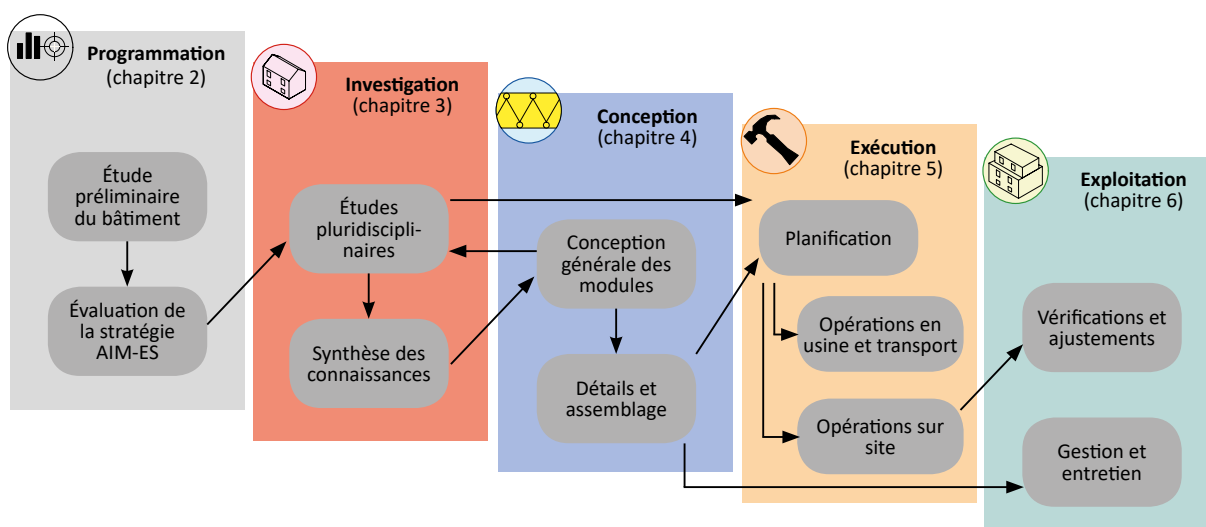
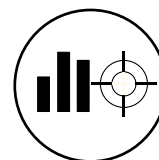


Fig. 8 Structure du document et points de vigilance spécifiques aux projets de rénovation.

2. PROGRAMMATION DU PROJET DE RÉNOVATION

2.1 RÉSUMÉ

Ce premier chapitre explique comment déterminer si la solution AIM-ES est applicable au programme de rénovation envisagé. Pour ce faire, il convient de procéder à un examen préliminaire de l'état du bâtiment et de trouver un compromis entre les améliorations attendues sur le plan environnemental, technique, organisationnel et architectural, d'une part, et les coûts directs de la rénovation, d'autre part.



Quels sont les objectifs du projet et comment déterminer si l'approche AIM-ES est applicable ?

2.2 FACTEURS À L'ORIGINE DE LA DÉCISION DE RÉNOVER

QUESTIONS CLÉS

- Quelles sont les raisons qui ont poussé à la rénovation ?
- Quelles sont les améliorations à apporter selon les occupants ?
- Des plaintes récurrentes de la part des occupants ont-elles été enregistrées ?
- La rénovation est-elle motivée par une quelconque obligation légale ?
- Existe-t-il des incitants à la rénovation ?
- À première vue, quels sont les éléments du bâtiment à remplacer, à modifier ou à supprimer ?
- Certains éléments doivent-ils être préservés ?
- La volumétrie du bâtiment doit-elle être modifiée ?
- Une extension du volume protégé est-elle envisagée ?

L'initiative de la rénovation vient généralement du propriétaire, qu'il s'agisse d'un particulier, d'une société ou d'une instance publique. **Plusieurs raisons peuvent inciter à rénover entièrement l'enveloppe d'un bâtiment**; citons parmi celles-ci :

- un changement d'affectation de l'immeuble
- une inadéquation du bâtiment aux desiderata en matière de qualité globale (dégradation excessive de la façade et/ou de la toiture, etc.), de confort et/ou de performance énergétique.

En général, la première étape consiste, pour le propriétaire et l'exploitant, à dresser la **liste des principaux objectifs** ou des axes prioritaires de la rénovation. En d'autres termes, ils doivent déterminer avec précision **l'état final souhaité** après la rénovation du bâtiment. Cela peut nécessiter le remplacement des châssis, l'isolation de la façade, le remplacement des balcons, une modification du plan au sol, etc. Pour définir ces objectifs, il est crucial d'**impliquer les occupants**, car ils sont les seuls, en tant qu'utilisateurs des lieux, à pouvoir identifier des problèmes qui ne sont pas immédiatement décelables (gêne acoustique, manque de confort à certains moments de la journée ou de l'année, etc.).



Fig. 9 Appartements à Londres avant rénovation : un immeuble caractérisé par une conception dépassée et des problèmes thermiques.



2.3 ÉTUDE PRÉLIMINAIRE DU BÂTIMENT

Pour aider à définir la stratégie globale de rénovation qui conviendra le mieux pour atteindre les objectifs fixés par l'exploitant, il y a lieu de rassembler et d'analyser un certain nombre de données générales sur le bâtiment (structure, utilisation, valeur actuelle ou potentielle sur le marché, etc.). Si ces informations ne sont pas directement disponibles, elles doivent être recueillies par le biais d'investigations ou de mesures simples (voir ci-après).

2.3.1 DÉFINITION DU PROFIL GLOBAL DU BÂTIMENT

QUESTIONS CLÉS

- Quelles sont les principales caractéristiques architecturales et techniques du bâtiment ?
- Quelles sont les caractéristiques des logements individuels ?
- Quelle est la 'typologie' générale du bâtiment et comment celui-ci s'intègre-t-il dans son environnement ?
- Quelles sont les contraintes générales liées à la valeur architecturale du bâtiment ou au statut archéologique de son lieu d'implantation ?
- L'immeuble bénéficie-t-il d'un statut de protection juridique ?
- À défaut, existe-t-il un contexte extralégal pouvant entraîner des contraintes ou des retards dans les interventions ?

Cette étape a pour but de fournir un descriptif général du bâtiment sur la base d'informations telles que :

- le type de construction
- l'année de construction
- l'année de la dernière rénovation
- la situation ou l'environnement
- la volumétrie globale ou la forme de l'édifice
- le type et le nombre d'étages
- les dimensions extérieures
- le nombre de logements
- la taille caractéristique d'un logement
- le type et le nombre d'accès principaux
- le type et le nombre de balcons et de terrasses.

La méthode AIM-ES ne se prêtant pas forcément à tous les types de constructions, une analyse typologique du bâtiment constituera une première base de discussion en vue de définir les options de rénovation. Ainsi, un immeuble situé dans un environnement fortement urbanisé présentera rarement l'accessibilité requise pour acheminer des éléments de façade de grandes dimensions. Du côté des pouvoirs publics locaux, une analyse typologique du parc d'habitations peut s'avérer utile pour élaborer une politique du logement et une stratégie de rénovation à l'échelle d'une ville ou d'une commune.

Un outil web européen développé dans le cadre du projet TABULA [86] décrit les typologies de bâtiments de divers pays, dont la Belgique (figure 10, p. 12).

En Suisse, l'université de Lucerne a mis au point, en collaboration avec l'IEA Annex 50 [81], une typologie détaillée adaptée aux modules de rénovation préfabriqués, sur la base de trois paramètres : la position du module dans le bâtiment, le nombre d'étages et la période de construction.



Country	Region	Construction Year Class	Additional Classification	SFH Single Family House	TH Terraced House	MFH Multi Family House	AB Apartment Block
	national (Belgie)	... 1945	generic	 BE.N.SFH.01.Gen	 BE.N.TH.01.Gen	 BE.N.MFH.01.Gen	
	national (Belgie)	1946 ... 1970	generic	 BE.N.SFH.02.Gen	 BE.N.TH.02.Gen	 BE.N.MFH.02.Gen	 BE.N.AB.02.Gen
	national (Belgie)	1971 ... 1990	generic	 BE.N.SFH.03.Gen	 BE.N.TH.03.Gen	 BE.N.MFH.03.Gen	 BE.N.AB.03.Gen

Tabula

Fig. 10 Typologies belges de bâtiments selon l'outil Tabula [86].

Pour identifier la **valeur culturelle ou historique** de l'édifice, il est possible de faire appel à des spécialistes du patrimoine architectural. La **valeur architecturale et/ou archéologique** du site doit également être connue. En présence d'un site classé, le processus de rénovation devra répondre à des exigences légales spécifiques. Dans certains cas, il n'existe pas d'exigences légales à proprement parler, mais les autorités peuvent imposer des limites aux interventions possibles. **La solution AIM-ES a un impact important sur l'aspect extérieur d'une construction**; elle n'est donc pas applicable aux bâtiments dont la façade est classée, à moins de pouvoir la combiner à une approche plus traditionnelle.

2.3.2 PRÉDIAGNOSTIC

QUESTIONS CLÉS

- Quel est l'état général du bâtiment ?
- Quelle évaluation globale peut-on faire de sa performance énergétique (sur la base de méthodes d'investigation rapides) ?
- Au regard de l'état du bâtiment, quelle est l'ampleur de la tâche pour accroître sa valeur ?
- Comment les occupants voient-ils leur cadre de vie ?
- Que pensent-ils de la rénovation du bâtiment ?
- Selon eux, à quoi devrait-on remédier ?
- Quelle méthode de sondage pourrait être facilement utilisée pour répondre à ces questions ?

La phase du prédiagnostic consiste à examiner l'état général du bâtiment. Elle permet d'évaluer rapidement l'ampleur des interventions à envisager, parmi lesquelles certaines n'ont peut-être pas été planifiées par le propriétaire. Les informations recueillies serviront de **cadre de décision préalable à la rénovation de l'ouvrage**. Il ne s'agit pas à ce stade de réaliser une expertise détaillée, laquelle sera effectuée ultérieurement (voir § 3.3, p. 28).

L'**efficacité énergétique** joue un rôle particulièrement important dans l'évaluation de la qualité d'un bâtiment. La première étape du prédiagnostic visera donc à fournir toutes les informations utiles à cet égard; il convient pour ce faire :

- de déterminer si des opérations de rénovation énergétique ont été réalisées antérieurement (rénovation complète ou partielle)
- de comparer la consommation annuelle à celle de constructions similaires



- de décrire brièvement la structure et l'enveloppe du bâtiment
- de décrire les systèmes HVAC
- d'effectuer quelques mesures simples (conditions hygrothermiques intérieures, thermographie, etc.)
- d'interroger les occupants de l'immeuble.

La deuxième étape du prédiagnostic consiste en une brève évaluation de l'état du bâtiment et de ses installations :

- état général de la structure, de la toiture, de la façade, des menuiseries, etc.
- signes de pathologie : problèmes structurels (fissures, déformations, etc.), humidité (humidité ascensionnelle, moisissures), efflorescences, etc.
- pertinence technologique des systèmes HVAC existants.

Enfin, la **qualité des logements individuels** peut être examinée sur la base des normes de confort actuelles (par exemple, taille des logements, équipements, conditions d'éclairage, problèmes d'humidité, isolation acoustique entre logements et par rapport à l'extérieur). Pour cette étape, l'implication des occupants s'avère particulièrement précieuse et permettra de gagner du temps.

Les informations nécessaires à l'établissement des rapports de prédiagnostic peuvent provenir de **sources diverses** : dessins d'archives, documents officiels, photographies, interviews, vérification visuelle, etc. Plusieurs systèmes de cotation peuvent servir à évaluer la qualité d'un bâtiment au sein du parc de logements et à prévoir les interventions prioritaires. Une étude de l'UCL [58] décrit un tel système de cotation pour la Wallonie. La combinaison des caractéristiques typologiques de l'édifice et de son état général fournit des informations essentielles pour évaluer la pertinence de l'approche AIM-ES, ce qui constitue un plus pour les décideurs politiques.

Les occupants du bâtiment devraient être impliqués dans la démarche dès le début du processus décisionnel. Bien qu'ils ne maîtrisent pas nécessairement toutes les pathologies liées à l'enveloppe et aux installations, ils peuvent néanmoins **aider l'architecte à en identifier les symptômes**. Une bonne communication garantit en outre que les occupants acceptent les choix de conception et participent à leur élaboration. De nombreux exemples d'interaction entre les professionnels et les résidents sont cités dans plusieurs ouvrages repris en bibliographie [1, 48, 53].

2.4 ÉVALUATION PRÉALABLE DE LA STRATÉGIE DE RÉNOVATION AIM-ES

QUESTIONS CLÉS

- Le recours aux modules préfabriqués est-il approprié ?
- Quels en sont les avantages ?
- Peut-on envisager de combiner plusieurs solutions de rénovation ?
- En cas de recours aux modules préfabriqués, quel est le niveau de préfabrication le plus adéquat ?

2.4.1 PARAMÈTRES UTILES POUR ÉVALUER LA STRATÉGIE DE RÉNOVATION AIM-ES

Le recours aux modules AIM-ES peut apporter une solution adaptée lorsqu'on envisage de rénover des façades en profondeur. La technique répond en effet à des standards de qualité élevés, offrant de hautes performances énergétiques et d'indéniables avantages liés à la pré-



fabrication (mise en œuvre indépendante des conditions météorologiques, par exemple) et à la possibilité pour les résidents de continuer à occuper les lieux pendant la durée des travaux. Cependant, **plusieurs exigences doivent être respectées pour que cette solution puisse être considérée comme adéquate et économiquement viable.**

L'architecte devra examiner la pertinence de la technique à la lumière de cinq types de critères : légaux et contextuels, économiques et environnementaux, socioculturels et enfin organisationnels.

2.4.1.1 Critères légaux et contextuels

Ces critères portent tout d'abord sur les limites d'intervention résultant de la valeur architecturale de l'immeuble, de la valeur archéologique du site ou d'exigences urbanistiques. **Le type de bâtiment et son utilisation future peuvent aussi entraîner des contraintes supplémentaires.** En l'absence de valeur patrimoniale, les critères légaux concernent souvent l'augmentation des dimensions de l'ouvrage et la modification de son apparence.

La disponibilité d'une expertise locale pour la mise en œuvre de la technique AIM-ES est un exemple de paramètre 'contextuel', dans la mesure où elle nécessite un équipement adapté (chaîne de production capable de traiter de grands éléments de façade pour permettre un niveau de préfabrication poussé) et des compétences spécifiques, notamment pour la manipulation des éléments sur chantier.

2.4.1.2 Critères économiques et environnementaux

L'analyse de la faisabilité économique sera basée sur une **comparaison entre l'état du bâtiment et son potentiel sur le marché**, comme le décrit brièvement l'IEA Annex 50 [82]. Pour évaluer les avantages financiers d'une performance énergétique accrue, il faut distinguer la situation dans laquelle le propriétaire utilise effectivement l'immeuble et celle où ce n'est pas le cas. Dans le premier cas, une efficacité énergétique accrue entraînera une diminution du coût d'utilisation et un retour sur investissement facile à calculer pour le propriétaire. Dans le second, l'amélioration de qualité et de confort consécutive aux travaux engendrera un accroissement de la valeur du bâtiment sur le marché.

Le coût plus élevé de la conception d'une enveloppe de type préfabriqué doit être mis en perspective avec les **gains économiques qui découleront de la phase de chantier**. Un contrôle de qualité accru et une phase de montage plus rapide peuvent, par exemple, entraîner une baisse du budget d'exécution grâce à une limitation des ajustements sur chantier, une réduction possible des dépenses de l'entrepreneur (location de machines, installation d'échafaudages) et, le cas échéant, une reprise plus rapide des activités économiques exercées au sein de l'immeuble.

Les objectifs en termes de **qualité environnementale** du projet (gestion des déchets et de l'eau, santé des occupants, etc.) doivent également être mis sur papier. À cet égard, divers incitants (bâtiments 'exemplaires', par exemple) pourraient éventuellement être obtenus; les critères exigés devraient alors être analysés à la lumière de ce qui serait réalisable avec la solution AIM-ES.



2.4.1.3 Critères techniques

L'amélioration du bâtiment devrait être considérée aussi bien sur la base des objectifs initiaux énoncés par le propriétaire que sur la base des caractéristiques de la construction existante. En effet, [les principaux obstacles techniques à la mise en œuvre du système AIM-ES résident dans un manque de compatibilité de l'édifice existant](#). Du point de vue de la production et de l'exécution, il est préférable, par exemple, que le bâtiment présente un certain degré de répétabilité pour qu'une approche de préfabrication soit viable. Même si les panneaux préfabriqués peuvent, en théorie, se poser sur des façades complexes, une telle solution n'est généralement pas rentable à l'heure actuelle.

Si le bâtiment est techniquement compatible avec la solution AIM-ES, les avantages qui en découleront seront nombreux : diminution du nombre d'interventions à l'intérieur de l'édifice, possibilité d'extension ou de rehausse, contrôle de qualité accru, intégration des systèmes dans la nouvelle enveloppe, etc.

2.4.1.4 Critères socioculturels

Pour l'équipe du projet, l'implémentation d'une façade AIM-ES exige de maîtriser des [processus de travail hautement collaboratifs](#). Un manque de communication peut entraver le succès de l'opération vu la courte durée de la phase de mise en œuvre, surtout s'il s'agit de systèmes préfabriqués d'une haute technicité. Les schémas de travail typiques du secteur de la construction, très linéaires et peu interactifs, peuvent donc constituer un frein au succès de la démarche.

Au cours de la mise en œuvre, la solution AIM-ES permet de réduire les nuisances pour les occupants, dont les activités sociales seront moins touchées, et ce sur une moins longue période. C'est un exemple d'avantage social fort de l'approche. À l'opposé, l'impact visuel important que peuvent avoir les interventions sur le bâtiment, ainsi que le rejet ou la mécompréhension des technologies (stores automatiques, groupes de ventilation décentralisés, etc.) sont des exemples de points critiques qu'il faut prendre en compte pour garantir la réussite du projet.

2.4.1.5 Critères organisationnels

Le choix d'une stratégie de rénovation passe par l'analyse d'un grand nombre de paramètres organisationnels. Comme mentionné au point précédent, les différentes équipes impliquées dans le projet doivent davantage interagir que dans le cas d'une approche traditionnelle. Cela nécessitera une attribution correcte des tâches, un suivi et/ou un contrôle réguliers, le tout mené dans le cadre d'une stratégie 'lean' élaborée (voir [Les Dossiers du CSTC 2016/3.16](#) et [2018/2.15](#)) [34, 85]. Pour garantir un travail efficace, le transfert d'informations doit en outre être organisé de façon rigoureuse et intégrer éventuellement une approche BIM. Enfin, la solution AIM-ES offre également des avantages en matière de respect des délais.

2.4.1.6 Tableau de synthèse

Le tableau 1 (p. 16) reprend les principaux paramètres intervenant dans la validation de la stratégie de rénovation en phase de programmation (avant-projet).



Tableau 1 Exemples de paramètres à prendre en compte pour évaluer la faisabilité de la solution AIM-ES.

CRITÈRES	PARAMÈTRES LIÉS AU PROJET DE RÉNOVATION	PARAMÈTRES LIÉS AU BÂTIMENT DANS SON ÉTAT INITIAL	PARAMÈTRES LIÉS À L'EXÉCUTION	PARAMÈTRES LIÉS AU BÂTIMENT RÉNOVÉ
Légaux et contextuels	Restrictions urbanistiques (!) Restrictions patrimoniales (!) Restrictions archéologiques Subsidés possibles Disponibilités d'experts pour la technique de rénovation envisagée (!)	Type de bâtiment et utilisation Valeur patrimoniale Valeur archéologique	Incidence du chantier sur le trafic (+)	Possibilité d'utiliser le bâtiment comme 'démonstrateur technologique' (+)
Économiques et environnementaux	Budget Retour sur investissement espéré Performance énergétique visée (+) Subsidés visés (+)	État du bâtiment Valeur du bâtiment sur le marché Revenu locatif Performance énergétique	Coûts liés aux opérations sur chantier (+/!) Coûts liés aux ajustements imprévus sur chantier (+/!) Impact des travaux sur les activités économiques exercées au sein du bâtiment (+) Impact des travaux sur l'environnement	Qualité environnementale du bâtiment rénové (+) Valeur du bâtiment rénové sur le marché Revenu locatif Performance énergétique (+) Utilisation d'énergies renouvelables
Socioculturels	Interactions entre acteurs du projet (!) Interactions avec les occupants du bâtiment Interactions avec le voisinage	Habitudes sociales des occupants Attachement à l'architecture du bâtiment (!) Qualité de vie et satisfaction des occupants	Impact des travaux sur les activités sociales exercées dans le bâtiment Nuisances causées par les travaux pour les occupants et le voisinage	Qualité de vie et satisfaction des occupants Appropriation des nouveaux espaces créés Acceptation des nouveaux équipements installés
Techniques	Objectifs en terme de performance (+) Objectifs en terme de qualité (+)	Nombre d'étages (!) Nombre et types de baies (!) Irrégularités géométriques de la façade (!) Pathologies existantes État des équipements	Possibilité de contrôler la qualité des interventions Équipement nécessaire pour la réalisation des travaux (+/!)	Nouveaux volumes créés (+) Mise en place d'installations solaires (+) Mise en place ou rénovation d'un système de ventilation (+) Autres équipements intégrés (+)
Organisationnels	Efforts de planification (!) Transfert d'information entre partenaires du projet (!) Transfert d'information vers les occupants	Type d'occupation des logements	Saison d'exécution des travaux (+) Durée des opérations sur chantier (+) Nécessité de reloger les occupants durant les travaux (+) Aménagements temporaires liés aux travaux	Familiarisation des occupants et du gé- rant avec les nouvelles technologies (!) Fréquence de maintenance des équipements (!) Facilité de maintenance des équipements (!)
<p>(!) Paramètres particulièrement sensibles lorsqu'on envisage la solution AIM-ES. (+) Paramètres pour lesquels la solution AIM-ES offre un avantage par rapport aux solutions traditionnelles.</p>				



2.4.2 OUTILS COMPLÉMENTAIRES POUR L'ÉTUDE DE FAISABILITÉ

De nombreux outils et documents peuvent aider le planificateur à orienter la stratégie globale de rénovation [65]. Le *European Retrofit Advisor* développé dans le cadre du projet de recherche 'E2Rebuild' propose, par exemple, de comparer la faisabilité des solutions AIM-ES par rapport à des techniques plus conventionnelles.

On constate que les aspects liés à l'énergie jouent souvent un rôle central dans les études préalables de faisabilité. De simples simulations énergétiques permettront souvent d'évaluer les avantages de divers scénarios en termes d'efficacité énergétique et d'amélioration du confort, tout en y associant les coûts correspondants. La géométrie du bâtiment, donnée nécessaire aux modèles énergétiques, peut être étudiée à ce stade à l'aide de méthodes simples mais efficaces comme la photogrammétrie multiimages (voir § 3.2.2.1, p. 22).

2.4.3 MISE EN PLACE DU PROJET

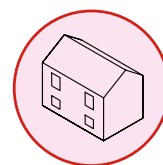
Une fois les objectifs de la rénovation définis et la viabilité de la technique AIM-ES ⁽¹⁾ provisoirement validée, une équipe pluridisciplinaire doit être mise sur pied afin de concrétiser la conception. Dans ce contexte très interactif, **les responsabilités de chaque acteur doivent être clairement définies dès le début du projet**. Un rapport issu de la recherche 'E2Rebuild' [48] donne de nombreux exemples de démarrage de projet qui illustrent la diversité des modèles de collaboration susceptibles d'être appliqués lors d'une opération de rénovation de façades intégrant une phase de préfabrication.

(¹) Combinée éventuellement à des techniques de rénovation plus traditionnelles.

3. INVESTIGATION DU BÂTIMENT

3.1 RÉSUMÉ

Ce chapitre explique comment l'équipe de conception peut mener une investigation complète de l'ouvrage, de ses éléments et de ses alentours pour concevoir les modules AIM-ES en tenant compte des obstacles potentiels. Il s'agit en quelque sorte d'**approfondir et de compléter l'étude préliminaire réalisée en phase de programmation** (voir § 2.3, p. 11). On estime qu'une telle investigation permet d'économiser entre 2 et 5 % du coût total du projet [45].



Quelles sont les caractéristiques du bâtiment existant et quel est leur impact sur la conception des modules de façade préfabriqués ?

Les résultats de la phase d'investigation consistent en un ensemble de rapports et de documents portant sur :

- la compatibilité du bâtiment et de ses alentours avec une approche de rénovation par éléments préfabriqués
- les problèmes hygrothermiques et structurels à traiter avant la rénovation de l'enveloppe ou susceptibles d'être résolus grâce à celle-ci
- les contraintes inhérentes à la conception des modules de façade AIM-ES.

Il convient en particulier de fournir les données suivantes :

- une évaluation détaillée de la performance du bâtiment en l'état : état *as it is* de la structure, de l'enveloppe et des systèmes, avec un inventaire des pathologies et des ponts thermiques; évaluation du comportement hygrothermique, de la performance énergétique ainsi que du confort et de la sécurité des utilisateurs
- la capacité portante des murs, des fondations et des autres éléments structurels
- les paramètres relatifs aux alentours du bâtiment susceptibles de se répercuter sur la gestion du chantier, sur son accessibilité et sur le choix de l'équipement nécessaire au montage des modules.

En pratique, l'équipe du projet devra élaborer un plan d'investigation définissant le rôle des acteurs concernés et prévoyant des canaux de communication appropriés. La figure 11 (p. 19) illustre les différentes étapes envisageables pour mener une investigation approfondie du bâtiment. Ces étapes ne sont pas présentées dans l'ordre chronologique et peuvent ne pas être toutes strictement nécessaires selon les informations disponibles en début de projet.

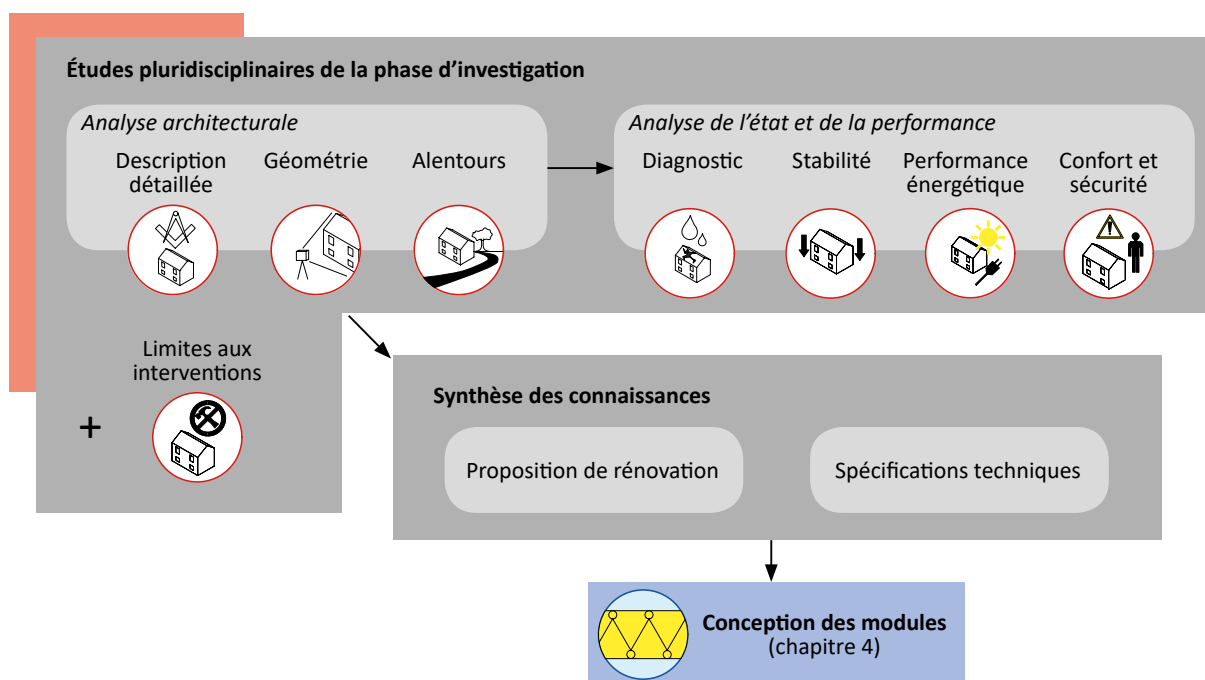
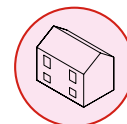


Fig. 11 Diagramme des actions à entreprendre durant la phase d'investigation.

3.2 ANALYSE ARCHITECTURALE

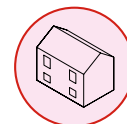
3.2.1 DESCRIPTION DÉTAILLÉE DU BÂTIMENT

	QUESTIONS CLÉS
	<ul style="list-style-type: none">• Quelles sont les caractéristiques architecturales des différents éléments du bâtiment ?• Lesquels de ces composants seront potentiellement impactés par la nouvelle façade ?• Comment s'organisent les espaces intérieurs ?• Quels sont les espaces de vie et les espaces de circulation ?• Où se trouvent les zones techniques et les locaux humides ?

Si cela n'a déjà été fait en phase de programmation, il convient de fournir une description morphologique et technique approfondie du bâtiment :

- caractéristiques constructives générales : configuration de la structure portante, types de fondations, types de toitures et de débords
- caractéristiques des logements individuels : taille, nombre et types de locaux, caractéristiques des espaces sanitaires et techniques
- plan au sol des espaces chauffés et non chauffés de chaque étage
- caractéristiques des éléments d'enveloppe : type, situation, orientation
- caractéristiques des baies et des balcons : type, nombre, taille, situation et orientation
- caractéristiques des accès principaux : nombre d'accès, caractéristiques des escaliers, trémies d'ascenseur, etc.

L'équipe du projet devrait avoir la possibilité de se baser sur une description *as built* précise de chaque élément de construction, y compris des éléments structurels (murs porteurs, dalle de fondation, etc.), des éléments non structurels (murs-rideaux, cloisons intérieures, etc.) et des systèmes HVAC. Chaque type d'élément doit être défini, de même que sa fonction et ses com-



posants (par exemple, matériaux constitutifs, composition multicouche éventuelle). À cette fin, il convient de rassembler les documents, plans et dessins existants permettant d'identifier clairement le contexte dans lequel les éléments ont été conçus et réalisés (plans d'avant-projet, plans de permis, plans d'exécution, etc.). Bien entendu, l'analyse architecturale de l'édifice est intrinsèquement liée à l'évaluation de sa performance (voir § 3.3, p. 28).

La caractérisation des éléments de construction est une étape cruciale pour planifier la conception des modules AIM-ES. Il existe différentes procédures pour identifier et classer les éléments d'un bâtiment. Des outils de description architecturale avancés ont été développés dans certains pays. Ainsi, par exemple, l'outil typologique suisse déjà cité précédemment [81] propose une systématisation très détaillée des éléments de construction, qui permet de déterminer la valeur ajoutée de la rénovation par éléments préfabriqués (figure 12). Le tableau 2 donne également un exemple de caractérisation des éléments du bâtiment.

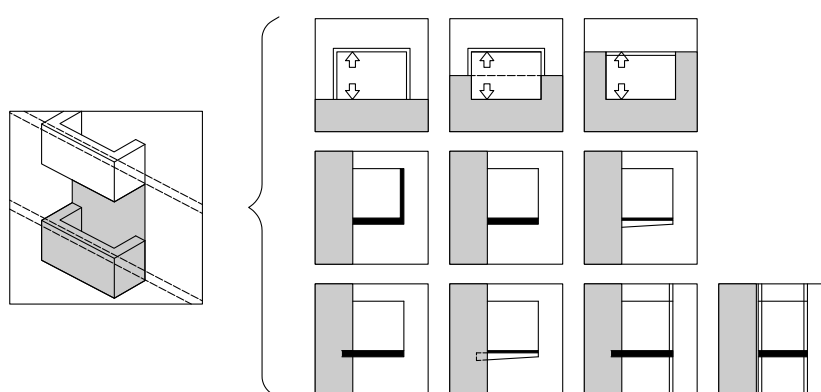


Fig. 12 Système de caractérisation détaillée d'éléments de construction développé en Suisse. Exemple de caractérisation d'un balcon (adapté de Schwehr) [82].

Tableau 2 Exemple de caractérisation d'éléments architecturaux : type de mur extérieur.

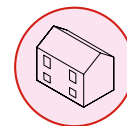
TYPE/SITUATION	MUR EXTÉRIEUR EN CONTACT AVEC UN ESPACE DE SÉJOUR		MUR EXTÉRIEUR SANS CONTACT AVEC UN ESPACE DE SÉJOUR	
Fonction portante	Oui ↓		Non	
	Type	Continu	Colonnes	
Configuration	Monocouche		Multicouche	
Isolation	Oui ↓		Non	
	Emplacement	Côté extérieur	Côté intérieur	Au centre
Finition extérieure	Revêtement		Plâtre	Briques/ciment

3.2.2 ÉTUDE GÉOMÉTRIQUE

QUESTIONS CLÉS

- Quelle est la géométrie exacte des façades sur lesquelles les modules seront fixés ?
- Quel est le niveau d'irrégularité de la façade existante ?
- Quelles sont les dimensions exactes des éléments architecturaux existants ?

Un projet de rénovation, en particulier lorsqu'il fait appel à des éléments préfabriqués de grandes dimensions, nécessite de rassembler des informations précises concernant la géo-



métrie réelle du bâtiment. Ces informations permettront, dans un premier temps, d'évaluer la **faisabilité générale** de la technique envisagée, de déterminer la nécessité de déposer une partie du parement et de s'orienter vers le système le plus approprié. L'analyse des données géométriques peut également fournir des informations utiles pour la conception des modules et, moyennant un traitement supplémentaire par l'intermédiaire d'un support CAO/FAO, peut directement contribuer au processus de fabrication (voir figure 13 et § 5.2.1, p. 83). Enfin, le principal avantage d'une étude géométrique rigoureuse réside dans la réduction significative des erreurs commises sur chantier et des frais qui en découlent.

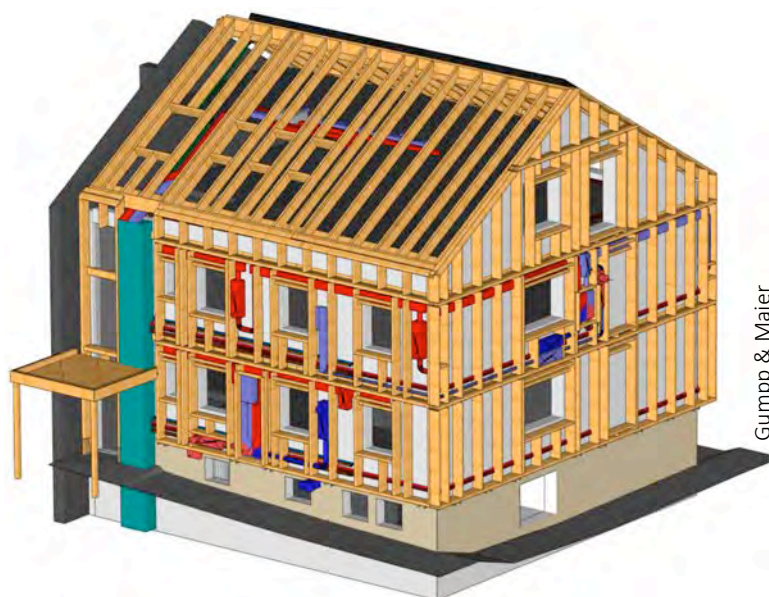


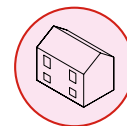
Fig. 13 Plan de fabrication de modules AIM-ES à base de bois [51].

Une inquiétude majeure lorsqu'il est question d'applicabilité des éléments AIM-ES tient à l'**irrégularité géométrique de la façade existante**. Dans la plupart des cas, les murs extérieurs présentent des irrégularités qu'il convient d'évaluer et de décrire. Comme les modules de façade préfabriqués sont rigides et peuvent avoir une grande portée, le processus d'ajustement peut s'avérer particulièrement complexe. Une étude approfondie et précise de la géométrie existante permettra de limiter les ajustements sur chantier et de prévenir des problèmes ultérieurs. En particulier, les données en 3D issues de l'étude géométrique peuvent être utilisées pour concevoir la couche d'adaptation entre les modules et les murs existants (voir § 4.4.2, p. 54) et pour anticiper le travail d'alignement.

L'objectif de cette section consiste à décrire brièvement les différentes techniques possibles en vue d'effectuer une analyse géométrique et d'établir un inventaire des fichiers livrables utiles. Une étude de cas bruxelloise est utilisée ici à titre d'illustration (figure 14).



Fig. 14 Étude de cas à Bruxelles : un immeuble d'appartements pour lequel la solution AIM-ES aurait un intérêt certain.



3.2.2.1 Technologies modernes envisageables pour l'étude géométrique

Si l'on met de côté les mesures manuelles ou les dispositifs simples comme les distancemètres, plusieurs technologies peuvent être prises en considération pour réaliser l'étude géométrique d'un bâtiment en vue de sa rénovation. Souvent, la meilleure solution consiste à combiner plusieurs techniques.

La première solution est la mesure traditionnelle à la station totale. Elle est basée sur l'évaluation de la position de **points discrets** à la surface de l'objet. Cette technique fournit des **informations très fidèles à la réalité**. Toutefois, elle peut s'avérer fastidieuse si l'on veut accroître le niveau de détail de la façade (comme c'est le cas avec les modules AIM-ES), en raison du temps nécessaire pour effectuer le relevé des points.

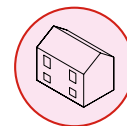
Il est à présent possible de relever, avec une précision redoutable, des millions de points géométriques à la surface d'un bâtiment (en intérieur ou en extérieur) ou d'un de ses composants. On parle de **relevé à haute définition** (ou parfois de 'scanning 3D'). Pour comprendre cette famille de technologies, il est utile de s'attarder sur le fonctionnement du **scanner laser**, la deuxième méthode utilisable pour étudier une rénovation par éléments préfabriqués. Les scanners laser émettent des faisceaux laser capables de mesurer une distance alors qu'ils retournent vers la source après avoir ricoché sur la surface à mesurer. La technologie actuelle permet d'envoyer des milliers de faisceaux par seconde, ce qui produit un '**nuage de points**' dans l'espace tridimensionnel (figures 15 et 16). Chaque point collecté est référencé dans l'espace par rapport à l'appareil de mesure, avec une précision pouvant atteindre le millimètre.



Fig. 15 Données 3D brutes issues d'un scanner laser (étude de cas bruxelloise).



Fig. 16 'Nuage de points' issu d'un relevé 3D à haute définition.



Une autre technologie utile est la **reconstruction photogrammétrique multiimage**. Ici, la forme tridimensionnelle d'un objet est reconstruite automatiquement dans un logiciel, au départ de simples photographies de l'objet sous différents points de vue. La précision géométrique obtenue est moindre qu'avec le scanner laser, mais la restitution texturale est bien plus précise (rendu des couleurs). Les logiciels modernes assurent un haut degré d'automatisation; des nuages de points précis et de densité très élevée peuvent être créés à partir d'un très grand nombre de photos (jusqu'à plusieurs centaines d'images traitées) sans requérir de connaissances poussées en photogrammétrie.

Des explications détaillées sur le fonctionnement des technologies de scannage à haute définition sont fournies dans la monographie du CSTC '**Le relevé 3D à l'heure du BIM**' [47].

3.2.2.2 Traitement des modèles 3D à haute définition

En aval de la phase de capture, un traitement des données très intensif en temps de travail est nécessaire pour obtenir des informations utiles à partir des modèles 3D haute définition issus des scanners laser ou de la reconstruction photogrammétrique. Le rapport entre la durée du relevé géométrique sur site et le délai de traitement peut varier de 1:1 à 1:50 selon les exigences de l'analyse [50]. Un problème courant concerne la manipulation des données, qui peuvent atteindre plusieurs dizaines de gigaoctets en cas d'acquisition à haute résolution ou de combinaison de plusieurs nuages de points. Pour cette raison, il peut être intéressant de simplifier un nuage de points bruts en en conservant, par exemple, des tranches de quelques centimètres, espacées régulièrement sur la hauteur ou la largeur du bâtiment [50]. Cette méthode diminue nettement la complexité des données brutes, tout en préservant les informations utiles.

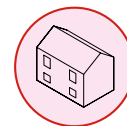
Une étude géométrique correctement menée sera extrêmement utile aux entrepreneurs impliqués dans le projet de rénovation. Les livrables finaux que l'on peut obtenir d'un scan 3D à haute définition sont très variés, tout comme les niveaux d'exigence quant à la précision de mesure. Ce sont les objectifs de l'étude qui vont orienter le choix d'une technologie plutôt qu'une autre ainsi que les modalités de relevé et de posttraitement des données. Dans tous les cas, il faut garder à l'esprit qu'un 'beau modèle' n'est pas nécessairement exact ou précis.

3.2.2.3 Objectifs de l'étude géométrique

La définition des objectifs de l'étude géométrique par le commanditaire est aussi critique que le relevé et le traitement lui-même. Car une mauvaise définition initiale des objectifs se traduira nécessairement par une inadéquation entre les livrables et l'usage qu'on envisage d'en faire. Idéalement, les objectifs devraient être définis en concertation avec les différents acteurs du projet, faute de devoir rappeler plusieurs fois le géomètre sur site. Ainsi, s'il l'on peut récupérer des informations simples, comme la position des baies, à partir d'un scan 3D complexe, il sera impossible d'avoir une image détaillée de la planéité des façades existantes sur la base d'un relevé à la station totale.

Dans la définition des objectifs de l'étude, il faut pouvoir trouver les données suivantes :

- les informations architecturales à mettre en évidence
- les types de modèles numériques souhaités (par exemple, nuages de points, orthophotogra-



phies) et leurs caractéristiques selon l'utilisation finale visée (par exemple, résolution d'un nuage de points)

- le ou les formats souhaités des fichiers à fournir
- l'évolutivité potentielle des modèles (serait-il possible pour quelqu'un de se baser sur ce modèle pour en développer un nouveau ?)
- la tolérance dimensionnelle admissible.

Les **objets, volumes et surfaces du bâtiment à étudier** doivent être précisés clairement pour que le géomètre puisse élaborer un plan de balayage détaillé, afin de maximiser la correspondance entre le modèle obtenu et les besoins du concepteur du système AIM-ES et, *in fine*, de réduire les coûts. Les points critiques typiques pouvant être analysés sont les suivants (voir également la figure 17) :

- dimensions extérieures de chaque façade (bords extérieurs et angles)
- dimensions intérieures des pièces
- niveau et dimensions des éléments structurels sur lesquels les modules seront fixés
- géométrie des corniches et des débords de toiture
- géométrie des balcons et autres éléments hors plan
- situation exacte et dimensions des baies existantes, tant à l'intérieur et qu'à l'extérieur
- inégalité de la surface de la façade, courbure et aplomb des parois
- autres pathologies structurelles (fissures, éléments manquants, etc.)
- hauteur du terrain
- points de référence.

Les objectifs de l'étude doivent également être traduits en critères de performance : justesse et précision de mesure, niveau de détail souhaité, complétude du modèle fourni, etc. Il convient en outre de vérifier la précision de mesure lors des appels d'offres pour l'étude géométrique.

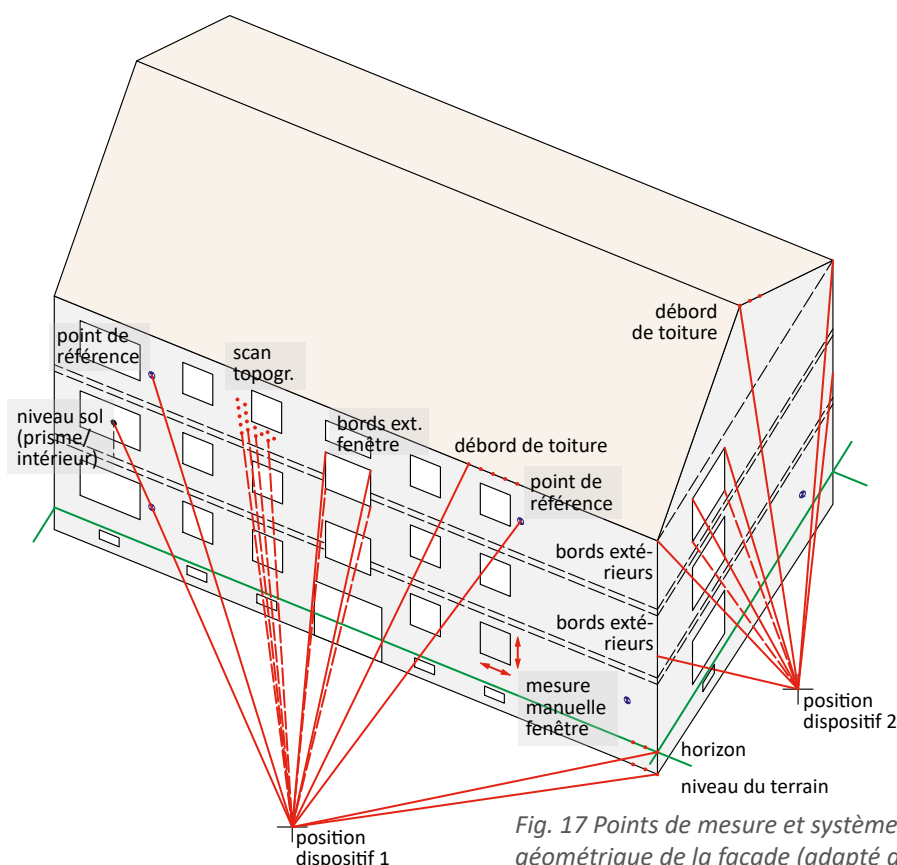
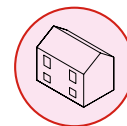


Fig. 17 Points de mesure et système de référence pour un modèle géométrique de la façade (adapté de F. Lattke) [65].



Dans le projet de modules AIM-ES à base de bois (TES) étudié au chapitre 4, une distinction est faite entre :

- la justesse admissible pour les mesures de points discrets (bords de fenêtres ou angles de bâtiment, par exemple)
- et la justesse admissible pour les mesures de points aléatoires utilisés pour évaluer l'irrégularité et l'aplomb de la façade.

Enfin, il est important de spécifier la précision requise, le cas échéant, pour la géolocalisation absolue du modèle (ainsi que le référentiel choisi).

Les **objectifs de l'étude** doivent être définis avec précision par les équipes de conception et de fabrication. Généralement, les données brutes provenant des appareils de mesure ne pourront pas être utilisées par les architectes-concepteurs et nécessiteront une phase de traitement pour obtenir des modèles 3D ou 2D exploitables.

Les modèles 3D finaux utiles pour la conception d'une façade préfabriquée multifonctionnelle peuvent inclure :

- un ou plusieurs nuages de points nettoyés et à densité élevée obtenus à partir de scans ou d'une reconstruction photogrammétrique, comprenant la façade et éventuellement les espaces intérieurs
- une combinaison de divers nuages de points nettoyés. Il convient de prêter attention à la taille des fichiers qui peuvent être tels qu'ils deviennent difficiles à exploiter sur des ordinateurs standard
- une interprétation ou une simplification d'un nuage de points. Les ouvertures et/ou les assemblages peuvent être modélisés à l'aide de représentations géométriques ou paramétriques adaptées aux points mesurés
- un maillage polygonal de la façade, dérivé du nuage de points bruts ou de son interprétation
- un maillage polygonal texturé surfacique, qui est une version détaillée du modèle précédent
- un modèle en primitives géométriques de l'enveloppe extérieure (tel que produit par des méthodes de modélisation basées sur l'image)
- un modèle en primitives géométriques complet, incluant les espaces intérieurs
- un modèle en primitives géométriques sémantisé (BIM), incluant ou non les espaces intérieurs.

Les fichiers images tels que les ortho-images constituent une première catégorie de livrables en 2D. D'autres modèles 2D plus classiques sont les dessins CAO en traits tels que les plans, les sections, les élévations et les détails de construction. Ces modèles peuvent être produits à partir des modèles 3D susmentionnés ou à partir d'ortho-images. Enfin, le commanditaire peut requérir des représentations bidimensionnelles plus spécifiques, telles qu'une représentation haute résolution de la planéité de surface d'une façade ou d'un élément de façade (figure 18, p. 26). Une telle représentation est particulièrement utile lorsqu'il s'agit d'évaluer l'adaptabilité des modules de façade préfabriqués aux murs existants. En connaissant les irrégularités de la façade avec exactitude, le concepteur peut choisir une couche d'adaptation appropriée (voir § 4.4.2, p. 54), dont l'épaisseur peut être réduite au minimum requis pour 'absorber' la forme des murs existants.

De nombreux autres paramètres importants peuvent intervenir dans la définition des objectifs de l'étude. Le planning du projet et le budget dégagé pour l'étude géométrique sont toujours décisifs et peuvent restreindre les possibilités.

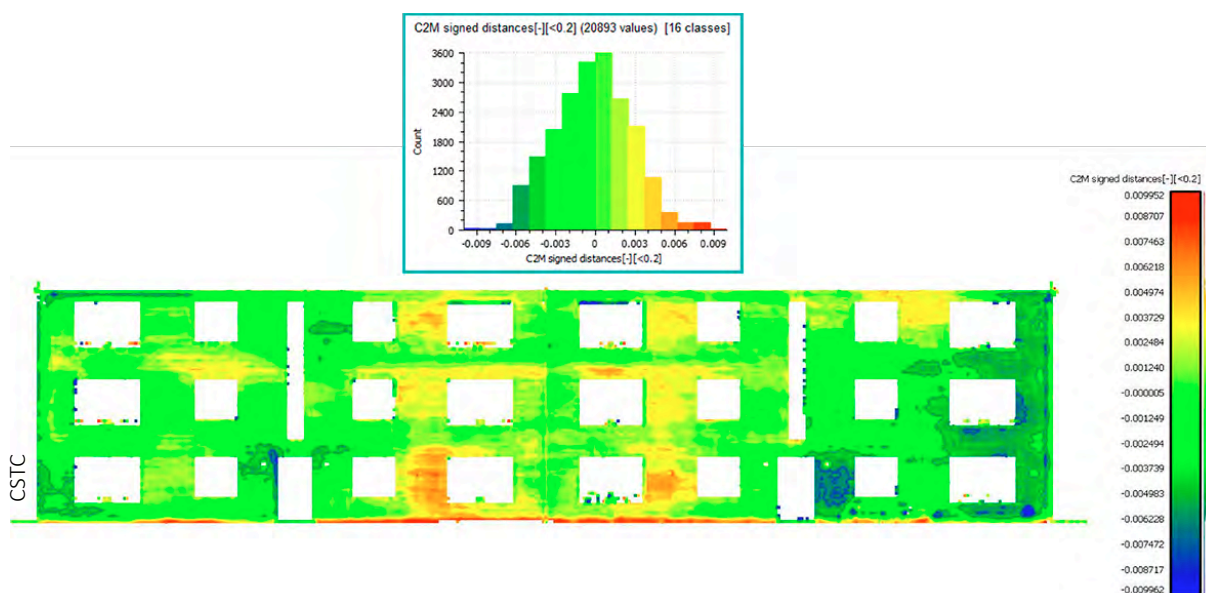
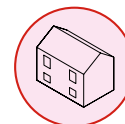


Fig. 18 Représentation 2D en haute résolution de l'irrégularité d'une façade et distribution des irrégularités – en l'occurrence, entre +10 et -10 mm par rapport à un plan de référence moyen (étude de cas bruxelloise).

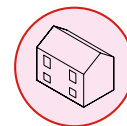
3.2.2.4 Tableau de comparaison des technologies de relevé 3D

Le tableau 3 fournit un aperçu rapide des principales différences qui distinguent les méthodes de relevé.

Tableau 3 Comparaison des méthodes d'étude géométrique.

CARACTÉRISTIQUE	STATIONS TOTALES	SCANNERS LASER	PHOTOGRAMMÉTRIE MULTIIMAGE
Précision (dimensions XYZ de grands éléments architecturaux)	Élevée à très élevée (1)	Très élevée	Faible à élevée (2)
Texture 2D (information couleur)	Impossible	Possible sur certains scanners (nuage de couleurs)	Possible (nuage de couleurs)
Texture 3D (petits détails dans la profondeur de la façade)	Impossible dans la plupart des cas	Possible avec une précision élevée	Possible (3)
Coût (matériel et logiciel)	Élevé	Très élevé (de 35.000 à 100.000 €)	Modéré (de 2.000 à 20.000 €)
Aptitudes requises pour l'acquisition des données	Élevées	Faibles	Faibles
Aptitudes requises pour le traitement des données	Faibles	Élevées	Très élevées
Délai d'acquisition	Long	Court	Court
Délai de traitement des données (pour obtenir des données exploitables)	Court	Long	Très long
Ressources informatiques (création / traitement de fichiers)	Très faibles	Élevées	Très élevées (4)

(1) Pour la plupart des systèmes, la précision dépend de l'opérateur.
 (2) Peut être 'très élevée', mais la précision de la photogrammétrie dépend fortement de la qualité de la série de photos et de l'absence de surface problématique sur la façade (surface réfléchissante ou de couleur unie, par exemple).
 (3) Ne constitue pas la méthode la plus facile pour évaluer l'irrégularité d'une façade.
 (4) Le traitement informatique basé sur le 'cloud computing' peut réduire les ressources requises.



3.2.3 ÉTUDE DES ALENTOURS DU BÂTIMENT



QUESTIONS CLÉS

- Le chantier est-il accessible pour la livraison des matériaux, de l'équipement et des modules ?
- Y a-t-il suffisamment d'espace pour stocker les matériaux, l'équipement et les modules ?
- Quels sont les systèmes de levage et de montage compatibles avec la configuration du site ?
- Le sol peut-il supporter la charge résultant de la livraison et du montage ?
- Quelles sont les possibilités d'extension du volume du bâtiment compte tenu de la configuration du site et des modules ?
- Quel est l'impact des environs sur l'éclairage naturel ?

3.2.3.1 Accessibilité

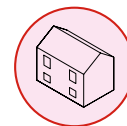
La rénovation au moyen de modules préfabriqués nécessite de satisfaire à des conditions préalables liées à l'accessibilité du chantier et à l'espace au sol disponible. Ainsi, il est nécessaire de prévoir, sur le chantier de rénovation, un espace de stockage plus ou moins grand selon la conception et le poids des modules de façade. Une **approche dite 'just-in-time'** peut éventuellement éliminer ou, du moins, limiter cette contrainte. L'équipement nécessaire au levage, au basculement éventuel et au montage des modules requiert également un espace au sol suffisant (et un rayon d'action pour la manipulation des modules). De plus, en fonction des dimensions des modules et du type de camion nécessaire pour leur transport de l'usine jusqu'au chantier, il convient de **garantir l'accessibilité (espace de manœuvre) tout le long de l'itinéraire de livraison** ainsi que sur le chantier jusqu'au lieu de stockage (voir § 5.3.5.1, p. 92). Autant de points cruciaux liés à l'environnement du bâtiment qu'il conviendra de garder à l'esprit au moment de choisir cette technique de rénovation particulière.

Alors qu'un système d'isolation extérieure composite ou des modules de petite taille peuvent nécessiter un simple échafaudage, les modules de grandes dimensions s'appuient sur des supports de plus grande taille ⁽²⁾ (grues mobiles, camions, par exemple) pour assurer un montage rapide et optimal. Il convient par conséquent de **décrire tous les obstacles potentiels dans les environs du bâtiment**. Certaines informations peuvent éventuellement être récupérées dans les relevés géométriques à haute définition, qui comprennent généralement une partie des alentours.

3.2.3.2 Extension des dimensions du bâtiment

Comme toute autre méthode d'isolation par l'extérieur, la rénovation au moyen de modules préfabriqués entraîne une **augmentation des dimensions externes de l'ouvrage**. Il faut dès lors prêter attention aux prescriptions urbanistiques ou à toute autre restriction légale en la matière.

⁽²⁾ Cette contrainte n'entraîne cependant pas d'augmentation de coût, étant donné l'accélération de la phase de chantier et la possibilité de se passer d'échafaudages.



3.2.3.3 Autres considérations


De nombreux autres aspects peuvent conditionner l'environnement direct d'un édifice :

- l'éclairage naturel : les objets et constructions entourant le bâtiment peuvent avoir un impact sur l'ensoleillement, lequel influence à son tour le bilan thermique et le confort visuel
- l'intégration de l'immeuble dans le quartier, sa cohérence par rapport aux prescriptions urbanistiques, etc.

3.3 ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE ET DE L'ÉTAT DU BÂTIMENT

Cette étape vise à décrire la **performance du bâtiment telle qu'initialement prévue, son état actuel** (diagnostic) et son impact sur la performance réelle. Cette description contient les informations nécessaires en vue de planifier les interventions requises pour atteindre les critères de qualité définis par l'équipe de planning. Elle peut également fournir des données essentielles pour la conception générale des modules (épaisseur de l'isolant, couches de protection, équipements techniques à intégrer, points d'ancrage potentiels, etc.). Les points faibles révélés à un stade avancé du planning, voire pendant la phase de construction peuvent perturber le programme des travaux et entraîner une hausse des coûts [74].

3.3.1 DIAGNOSTIC DE L'ÉTAT DU BÂTIMENT

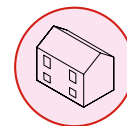
	QUESTIONS CLÉS
	<ul style="list-style-type: none">• Dans quel état se trouvent les éléments de construction ?• Certains éléments présentent-ils des dégradations nécessitant une rénovation ?• Quelles sont les causes des pathologies identifiées ?• Comment les éléments peuvent-ils être caractérisés sur le plan de leur performance hygrothermique ?• Quel pourrait être l'impact de l'état du bâtiment et de ses éléments sur la sécurité et le confort des utilisateurs ?

Parallèlement à la description détaillée de l'architecture du bâtiment, il faut analyser son état avec précision et établir un inventaire précis des problèmes pouvant nécessiter une intervention. La conception de l'ouvrage doit également être analysée à la lumière des normes actuelles.

3.3.1.1 Diagnostic des dégâts et pathologies

C'est la première étape du diagnostic du bâtiment. Elle vise à **identifier les pathologies**, leur origine et leurs conséquences. Le type de dégât peut varier en fonction de l'élément de construction considéré : fissuration, déformation excessive, corrosion d'éléments métalliques, biodégradation, moisissures (à la surface des murs ou à l'intérieur des matériaux, par exemple), mauvaise adhérence des finitions, efflorescences, etc. Pour chaque élément analysé lors de la description architecturale détaillée, un expert en diagnostic doit **identifier les problèmes qu'il conviendra de résoudre pendant le processus de rénovation et avant le placement des modules préfabriqués**.

Les causes physiques possibles d'une dégradation sont multiples : infiltration d'eau, vieillissement des matériaux, cycles extrêmes de températures, etc. Le gros du travail d'enquête



consiste à déceler l'origine de ces désordres : mauvaise conception, entretien insuffisant ou changement des conditions d'occupation d'un local. Il faut également garder à l'esprit que les pathologies sont susceptibles de provoquer des réactions en chaîne, avec de possibles effets d'autoamplification (par exemple, des fissures dans un enduit peuvent entraîner une infiltration d'eau qui, à son tour, peut donner lieu à une fissuration due aux cycles de gel et de dégel).

Des campagnes de monitoring peuvent aider l'expert dans son travail : suivi des conditions d'humidité dans une paroi, suivi des températures de surface à l'intérieur, etc. **Lorsqu'on envisage la mise en œuvre d'une façade AIM-ES, il convient d'accorder une attention particulière à l'intégrité des dalles de plancher (ou de tout autre point d'ancrage prévu), des fondations et des murs extérieurs.** La pose d'une peau extérieure, en limitant les possibilités de séchage d'un mur, peut altérer les équilibres dans l'enveloppe existante. Un mur présentant des infiltrations d'eau capillaire ne devrait donc jamais être revêtu d'un système AIM-ES sans traitement préalable adéquat.



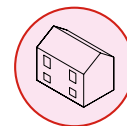
Fig. 19 Scan 3D utilisé pour l'inventaire et la caractérisation des pathologies.

Soulignons enfin l'intérêt des scans 3D pour la mise en évidence et la documentation de certaines pathologies sur les façades existantes (figure 19).

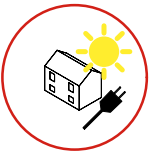
3.3.1.2 Diagnostic de la performance hygrothermique de l'enveloppe

La deuxième étape de l'analyse de l'état du bâtiment porte sur les éventuels problèmes liés au comportement hygrothermique de l'enveloppe. Il y a lieu de **déterminer avec précision les propriétés hygrothermiques de chaque matériau**, la conformité des assemblages aux normes actuelles et les dégradations pouvant influencer la performance théorique. La présence de tout élément spécifique jouant un rôle dans la propagation de la chaleur (par conduction, convection ou radiation), éventuellement non mentionné dans les plans d'origine, doit également être relevée. Il en va de même pour tout élément jouant un rôle dans l'étanchéité à l'air, la régulation de l'humidité, la transmission sonore ou la sécurité incendie. **Ces informations seront précieuses pour définir la fonction des modules AIM-ES ainsi que le niveau de performance à viser au moment de concevoir la nouvelle enveloppe.**

Il convient également de faire l'inventaire des **ponts thermiques**. À cet égard, **l'imagerie thermique s'avère très utile**. Pour compléter ces informations, il existe des catalogues de ponts thermiques pouvant aider l'expert à déterminer les coefficients de déperdition calorifique. Si un calcul informatisé plus précis est nécessaire ou si la géométrie diffère des cas de référence, il est possible d'utiliser des modèles de simulation dynamique de type BEHAM (*Building Element Heat Air and Moisture* – par exemple, WUFI Pro, DELPHIN), en 2D ou en 3D. **Les balcons existants constituent souvent une zone de ponts thermiques que l'approche AIM-ES permettra d'intégrer dans le volume chauffé.** À défaut, des balcons préfabriqués fixés aux nouveaux modules de façade peuvent remplacer les balcons existants. Tout modèle hygrothermique élaboré pendant la phase d'investigation pourra être utilisé ultérieurement pour évaluer l'impact des modules AIM-ES sur le comportement hygrothermique des murs (phase de conception).




3.3.2 ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE GÉNÉRALE

	<p>QUESTIONS CLÉS</p> <ul style="list-style-type: none">• Quelle est l'efficacité énergétique du bâtiment par rapport à des bâtiments similaires ?• Quel est son niveau d'étanchéité à l'air ?• Quels sont les points forts et les points faibles de la performance énergétique du bâtiment ?• Quelles sont les mesures énergétiques qui permettraient d'obtenir le meilleur rapport coût/efficacité ?
-----------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Le comportement hygrothermique du bâtiment existant dans son ensemble doit être défini avec précision afin de pouvoir procéder à une rénovation globale efficace. En règle générale, la consommation énergétique totale doit être évaluée au début du projet. Une méthode de mesure, de validation par calcul et de présentation des résultats est décrite dans la norme NBN EN ISO 52000-1 [30]. Des **campagnes de monitoring** peuvent être envisagées en parallèle, de manière à identifier les points forts et les points faibles du bâtiment. L'étanchéité à l'air joue un rôle primordial dans la performance énergétique de la construction. Un test d'infiltrométrie ('blower door') permettra d'évaluer les fuites énergétiques dues aux infiltrations ou aux exfiltrations d'air (cf. norme NBN EN ISO 9972) [25]. La **Note d'information technique n° 255** du CSTC fournit des informations utiles concernant la conception de l'étanchéité à l'air [43].

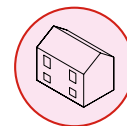
Des analyses complémentaires de l'efficacité énergétique peuvent être effectuées à l'aide d'**outils numériques de simulation portant sur l'ensemble du bâtiment**. Ces outils se basent sur des bilans thermiques par local, comprenant, d'une part, les pertes et gains par ventilation et par transmission au travers de l'enveloppe et, d'autre part, les apports de sources intérieures (systèmes HVAC, éclairage et occupation, par exemple). Les besoins en énergie pour le chauffage et le refroidissement peuvent être évalués pour chaque zone. L'analyse des transferts d'humidité se limite généralement à une modélisation simplifiée de l'humidité relative de l'air intérieur. **Les modèles énergétiques créés pendant la phase d'investigation pourront aussi être utilisés pour réaliser des simulations en phase de conception** et évaluer l'impact de plusieurs scénarios de rénovation énergétique.

3.3.3 ÉVALUATION DE LA SÉCURITÉ ET DU CONFORT DES OCCUPANTS

	<p>QUESTIONS CLÉS</p> <ul style="list-style-type: none">• Quel est le niveau de confort du bâtiment ?• Quelles sont les principales sources d'inconfort ?• Le bâtiment doit-il satisfaire à des exigences de sécurité incendie ? Y répond-t-il déjà, en partie ou totalement ?
-------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Le confort et la satisfaction des occupants dépendent des caractéristiques physiques des espaces de vie, lesquelles se traduisent en réactions physiologiques. Ils résultent aussi d'aspects comportementaux et psychologiques. Par exemple, une personne soucieuse de l'environnement acceptera plus facilement une température relativement basse en hiver, si elle sait que cela peut contribuer à réduire l'usage des énergies fossiles [89].

L'intégration d'équipements techniques dans les modules AIM-ES peut résoudre de nombreux



problèmes liés au bâtiment et mettre fin aux causes d'inconfort. Le choix des matériaux constitutifs des modules aura également un impact important. Pour l'évaluation du confort, des campagnes de monitoring et d'enquête auprès des occupants s'avèrent très utiles pour éclairer le processus décisionnel.

En ce qui concerne l'évaluation de la sécurité, la protection contre l'incendie (voir § 4.2.3, p. 41) et la stabilité (voir § 3.3.4 ci-dessous) sont essentielles. Deux aspects interviennent : d'une part, la manière dont le bâtiment est conçu et les normes ayant servi de base à cette conception et, d'autre part, l'impact de l'état de l'enveloppe et des systèmes sur les paramètres de sécurité initiaux. Il y a lieu également d'identifier les matériaux dangereux éventuellement présents dans l'ouvrage.

3.3.4 ÉTUDE DE STABILITÉ

	<p>QUESTIONS CLÉS</p> <ul style="list-style-type: none">• Quelle est la capacité du bâtiment à supporter la charge engendrée par les modules AIM-ES et les éventuelles extensions de volume ?• Quelle est la réserve de charge des fondations ?• Les éléments structurels sont-ils accessibles ?• Comment peut-on caractériser la stabilité des éléments de façade ?• Une étude spécifique est-elle nécessaire pour les murs creux ?
--	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

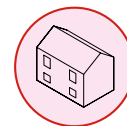
3.3.4.1 Concepts de base

Outre l'examen de l'état de la structure portante pendant la phase de diagnostic, une phase d'investigation spécifique doit être prévue pour **évaluer la capacité de la structure à supporter les nouvelles charges dues aux modules AIM-ES**. Les modalités de l'inspection sont principalement orientées par le poids des modules et la position de leurs ancrages ⁽³⁾ (voir § 4.6, p. 73). L'étude de la stabilité doit donc être planifiée en étroite collaboration avec l'équipe chargée de la conception des modules. Pendant et après la rénovation, il convient de garantir la sécurité (états limites ultimes – ELU), l'aptitude au service (états limites de service – ELS) et la continuité des activités (hôpitaux, bureaux, par exemple).

Dans les Eurocodes, l'estimation de la capacité portante est régie par un facteur de 'probabilité de défaillance' qui peut être calculé pour chaque bâtiment en fonction de l'état de ses éléments porteurs. Ce facteur détermine les risques et les conséquences d'un éventuel effondrement. Pour pouvoir définir ces facteurs de sécurité, il convient d'effectuer différentes analyses de la structure existante : analyses visuelles, études (éventuellement destructives) sur le terrain et, le cas échéant, essais en laboratoire.

En plus des plans architecturaux, il est important de disposer, pour de telles analyses, des **plans d'exécution, d'anciens rapports d'essai ou de calcul structurel**. En l'absence de documents originaux, il y aura lieu de réaliser des études globales et locales, afin de décrire la capacité portante avec la précision requise.

⁽³⁾ Pour un module AIM-ES à base de bois présentant une valeur U de 0,13 W/m²K, on prévoit un poids supplémentaire d'environ 85 kg/m² au niveau de la façade.



Les inspections préliminaires (analyses visuelles et études sur le terrain) conduiront à se poser des questions au sujet de la faisabilité du projet, telles que :

- est-il plus intéressant de réparer ou de démolir le revêtement de façade ?
- si le doute ne peut être levé que par des études coûteuses, n'est-il pas préférable de renforcer la structure (raccords, fondations, etc.) ?
- la structure nécessite-t-elle des interventions pour raisons de sécurité (nouvel enrobage sur des armatures dénudées, par exemple) ?

L'estimation de la réserve de charge peut s'avérer cruciale. L'expérience acquise dans le cadre du projet de Londres a par exemple révélé qu'une mauvaise identification de la forme des fondations et des dalles structurales pouvait donner lieu à un travail de conception supplémentaire et à des retards substantiels dans la mise en œuvre [64].

3.3.4.2 Sols et fondations

A. Situation, dimensions et géométrie des fondations

Les dimensions réelles et la géométrie des fondations sont souvent différentes de celles décrites dans les plans originaux. **Il importe dès lors que la description des fondations renvoie aux rapports d'exécution**, si de tels rapports existent. Les études géotechniques (radar, sonar, méthodes ultrasoniques, etc.) peuvent contribuer à compléter les informations disponibles, mais seule une excavation permettra d'apporter toutes les précisions utiles au sujet des fondations (figure 20).



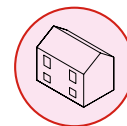
Fig. 20 Excavation effectuée dans le but de décrire le système de fondation.

B. État des fondations

Le principal problème qui se pose lorsqu'on évalue l'état des fondations tient à leur accessibilité. Certains bâtiments possèdent des caves dans lesquelles les murs de fondation sont visibles, ce qui permet d'examiner leur état. La partie des fondations en contact direct avec le sol est toutefois moins facile à observer. Une inspection du sous-sol peut être réalisée sous certaines conditions de stabilité (voir, par exemple, les **Infofiches n° 72.01 et 72.02** du CSTC) [54, 55]. Des échantillons peuvent ensuite être prélevés et testés de différentes façons (évaluation de la résistance à la compression, du niveau d'oxydation, etc.).

3.3.4.3 Ancrage des éléments de façade AIM-ES

Les modules AIM-ES seront ancrés dans les éléments porteurs horizontaux et/ou verticaux tels que dalles, poutres, murs ou colonnes. L'ancrage s'effectue souvent dans les dalles en béton (lorsqu'il y en a) en raison de leur résistance élevée. L'étude des supports d'ancrage potentiels dans le bâtiment et l'analyse de leur état permettra de **concevoir une configuration appropriée**



pour l'ancrage des éléments AIM-ES (utilisation d'une sous-structure de fixation, types et position des éléments d'ancrage, etc.). Dans certains cas, il est difficile d'obtenir des informations au sujet de l'état et de la nature des dalles existantes. À défaut de plans d'exécution, il y a lieu de mener des études sur le terrain, qui peuvent nécessiter l'élimination de certaines parties de finitions au plafond, sur les murs ou sur les planchers.

Des outils non destructifs tels qu'un endoscope ou un pachomètre peuvent être utilisés pour effectuer les inspections sur le terrain. L'endoscope fournit des informations visuelles dans des espaces difficiles d'accès. Le pachomètre permet, quant à lui, de contrôler la position des armatures dans le béton. Si nécessaire, des outils destructifs (marteau-piqueur ou foreuse, par exemple) peuvent fournir davantage de détails sur les éléments porteurs.

3.3.5 LIMITES D'INTERVENTION ET PROPOSITION DE RÉNOVATION

	<p>QUESTIONS CLÉS</p> <ul style="list-style-type: none">• Abstraction faite des contraintes légales, existe-t-il une volonté de préservation de certains éléments architecturaux ?• Quelles sont les interventions proposées et validées par les experts concernés (interventions 'classiques' et/ou mesures de rénovation énergétique) ?
--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Les limites à la rénovation de certains composants du bâtiment peuvent résulter soit de restrictions légales dues à la valeur historique ou architecturale de l'élément, soit d'une volonté de préserver une partie ou la totalité de certains éléments, que ce soit pour des raisons économiques ou non. De telles contraintes délimitent le champ des interventions possibles (les coûts constituant un deuxième frein important). Les contraintes liées aux interventions étant très variées et spécifiques à chaque projet, elles ne sont pas détaillées dans ce document.

Une fois que le diagnostic du bâtiment est établi et que les problèmes d'ordre esthétique, hygrothermique et structurel sont décrits, le planificateur peut proposer une liste d'interventions sur la base des conseils d'experts. Ces interventions peuvent être du domaine de la rénovation classique (injection contre l'humidité ascensionnelle, par exemple) ou de la rénovation énergétique (isolation supplémentaire de l'enveloppe, remplacement des fenêtres, mise à niveau des systèmes HVAC, etc.). Pendant la phase de traitement des informations, on déterminera quelles mesures peuvent être appliquées indépendamment de l'approche par modules préfabriqués et quels problèmes peuvent être résolus par une conception appropriée des modules.

3.4 SYNTHÈSE GÉNÉRALE

Le tableau 4 (p. 34) présente un récapitulatif des étapes d'investigation et leurs liens avec la phase de conception des modules de façade.

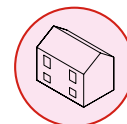


Tableau 4 Étapes d'investigation ayant un impact sur la conception des modules AIM-ES.

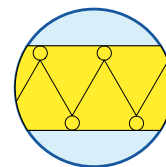
Étape d'investigation	Livrables	Principaux paramètres de la conception des modules	
Analyse architecturale	<p>Description détaillée</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Rapport(s) d'architecture • Description typologique et morphologique du bâtiment • Reportage(s) photographique(s) 	<ul style="list-style-type: none"> → Géométrie et dimensions des modules → Orientation des modules → Choix d'un système ouvert ou fermé → Taille typique des modules → Fixation des modules → Dispositions relatives à la sécurité incendie et à la performance acoustique
	<p>Étude géométrique</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Données géométriques brutes du bâtiment • Données géométriques traitées du bâtiment (CAO, BIM, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> → Géométrie et dimensions des modules (pour remédier à l'irrégularité de la façade) → Propriétés de la 'couche d'adaptation' (pour remédier à l'irrégularité de la façade) → Conception des baies
	<p>Étude des alentours</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Rapport(s) d'accessibilité • Données géométriques brutes du site • Données géométriques traitées du site (CAO, BIM, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> → Poids maximum admissible des modules avant le transport → Dimensions maximales des modules (selon l'espace de manœuvre requis) → Orientation préférentielle des modules → Conception des fenêtres et stores éventuellement intégrés aux modules
État et performance du bâtiment	<p>Diagnostic</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Rapport(s) de diagnostic • Données de monitoring • Modèle(s) de simulation hygrothermique des parois 	<ul style="list-style-type: none"> → Nécessité de veiller à ce que le processus de rénovation choisi ne crée pas de nouvelles pathologies ou n'en aggrave d'autres → Choix d'un système ouvert/fermé → Choix des systèmes à intégrer aux modules (châssis, ventilation, etc.)
	<p>Performance énergétique</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Rapport(s) de performance énergétique • Modèle(s) énergétique(s) • Modèle(s) hygrothermique(s) 	<ul style="list-style-type: none"> → Performance thermique requise → Technologies intégrées (fenêtres, ventilation, ...)
	<p>Sécurité et confort</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Rapport(s) de sécurité • Données de monitoring (confort - salubrité) • Enquête(s) auprès des occupants 	<ul style="list-style-type: none"> → Choix des matériaux → Technologies intégrées (fenêtres, ventilation ou autres équipements)
	<p>Stabilité</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Rapport(s) de stabilité • Modèle(s) de calcul structurel 	<ul style="list-style-type: none"> → Configuration de l'ancrage des modules → Poids maximum des modules → Dimensions maximales des modules → Possibilité d'utiliser les fondations comme supports pour les modules ou nécessité de prévoir un nouveau système de fondation → Systèmes de fixation des modules
Limites d'intervention et proposition de rénovation		<ul style="list-style-type: none"> • Inventaire de la valeur patrimoniale • Inventaire des éléments à préserver • Propositions d'interventions de restauration/rénovation 	<ul style="list-style-type: none"> → Couche extérieure des modules de façade → Épaisseur maximale des murs rénovés → Possibilité de mettre en œuvre un système de ventilation centralisé (pose de conduits dans les espaces intérieurs)

4. CONCEPTION DES MODULES

4.1 RÉSUMÉ

Le système AIM-ES couvre un vaste éventail de possibilités en termes de conception. Ce chapitre examine en détail les aspects suivants (figure 21) :

- principe et forme du module : type, paramètres géométriques généraux et fonctions
- composition du module couche par couche : types de couches constitutives, rôle(s) et matériaux utilisés
- systèmes et équipements intégrés : châssis, système de ventilation, panneaux solaires, etc.
- montage des modules : modes de fixation au bâtiment et raccord des modules entre eux.



Quel système de module de façade préfabriqué répond aux paramètres définis lors de la phase d'investigation ?

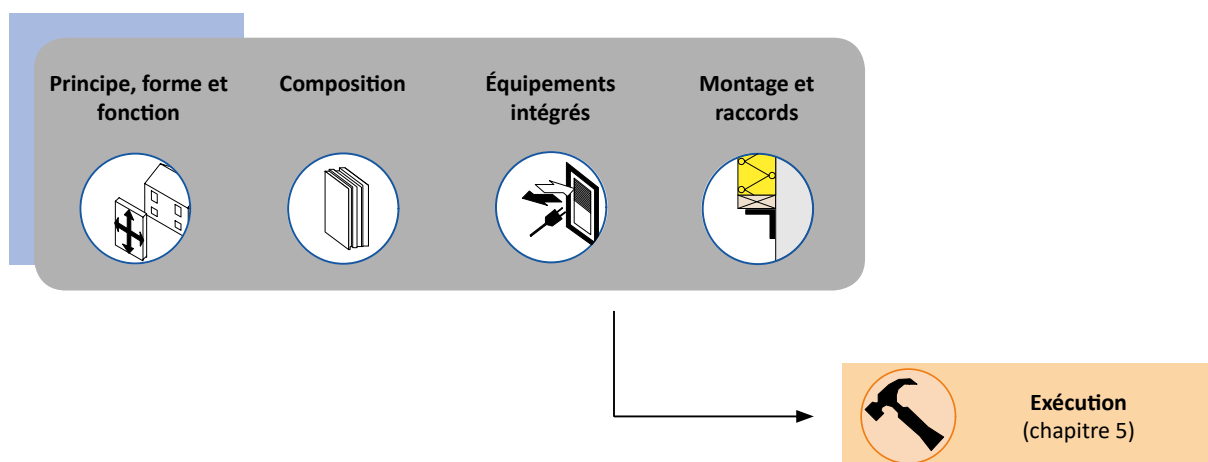


Fig. 21 Les quatre grandes facettes de la conception des modules.

La conception des structures de façade à base de bois étant basée sur des procédures validées et des modes d'assemblage éprouvés, nous donnerons la préférence, dans ce document, aux modules AIM-ES à base de bois (TES – voir la figure 22, p. 36). Ce chapitre aborde les aspects techniques majeurs de ces éléments; des informations complémentaires peuvent être trouvées dans d'autres documents de référence, mentionnés en permanence au fil du texte.

Les exigences générales formulées ci-après ont pour but de guider l'équipe de conception de la solution AIM-ES.

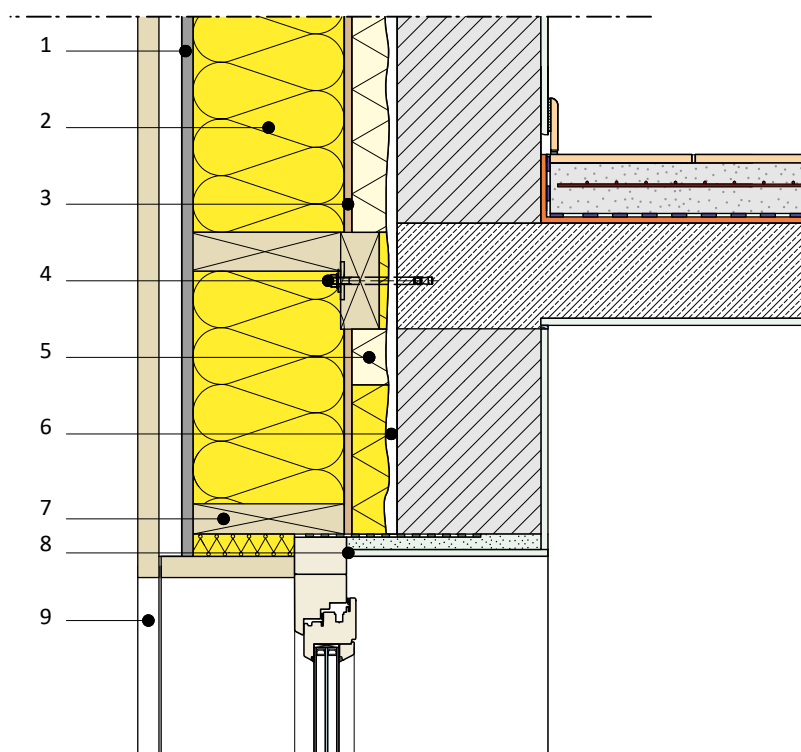
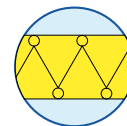


Fig. 22 Exemple de module AIM-ES à base de bois (TES) (adapté de F. Lattke) [65].

Section verticale

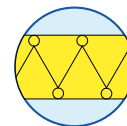
1. Plaque en fibrociment
2. Isolant en cellulose
3. OSB
4. Goujon
5. Laine minérale
6. Couche d'adaptation
7. Linteau
8. Mastic
9. Revêtement

4.2 EXIGENCES APPLICABLES À LA CONCEPTION

Au moment d'analyser les offres, le concepteur devra s'assurer que le système proposé et ses éléments de fixation sont conformes aux exigences réglementaires : la sécurité structurale, la sécurité incendie et la résistance à l'humidité sont autant d'aspects qu'il convient d'examiner scrupuleusement. Cette section vise à donner un aperçu général de plusieurs de ces exigences et des tâches de conception qui y sont associées.

4.2.1 HYGROTHERMIE

Les différents détails de construction doivent être étudiés et améliorés jusqu'à ce que la performance énergétique soit garantie et que les exigences relatives à la protection contre l'humidité soient respectées. Un travail global de contrôle de la qualité est en outre nécessaire pour **veiller à ce que les solutions choisies soient correctement mises en œuvre pendant la phase de réalisation** et que la performance prévue soit finalement atteinte. Les détails de construction susceptibles d'influencer l'étanchéité à l'air et la protection contre l'humidité sont particulièrement importants dans ce contexte et doivent donc être décrits avec précision.



4.2.1.1 Performance énergétique et confort

Un bâtiment doit être conçu dans le but de fournir à l'occupant un espace sécurisé et confortable au fil des saisons, tout en limitant au maximum l'utilisation des ressources non renouvelables. La conception 'basse énergie' implique de prendre les mesures suivantes :

- A. réduire les déperditions calorifiques
- B. diminuer les besoins en climatisation
- C. modifier les apports d'énergie.

La solution AIM-ES offre l'opportunité de répondre de manière intégrée à plusieurs de ces exigences.

A. Réduire les déperditions calorifiques

Les stratégies de conception visant à réduire les déperditions calorifiques par conduction sont bien connues : elles consistent à isoler soit par l'intérieur (voir [Les Dossiers du CSTC 2012/4.16](#) et [2013/2.4](#)) [88, 68], soit par l'extérieur (voir la [NIT 243](#) et [Les Dossiers du CSTC 2014/4.8](#) pour les bardages, la [NIT 146](#) pour les pierres agrafées et la [NIT 257](#) pour les enduits sur isolation extérieure) [35, 40, 44, 59]. La pose d'un nouveau revêtement sur une façade existante est une occasion idéale pour **améliorer le niveau d'isolation du mur et des fenêtres**. Comme décrit plus loin (voir § 4.4, p. 52), le choix des couches composant les éléments AIM-ES et la décision de maintenir ou de remplacer les fenêtres détermineront le niveau K de l'enveloppe rénovée. Pour les surfaces opaques, les valeurs U limites fixées par la PEB nécessiteront une certaine épaisseur pour la couche d'isolation, en fonction de la performance du mur existant et du matériau choisi pour l'isolation des modules. Il n'est pas rare de rencontrer des épaisseurs d'isolation de 300 mm ou plus pour atteindre des niveaux passifs. Comme démontré dans les études de cas, **la solution AIM-ES peut avoir une efficacité thermique très élevée, mais celle-ci sera souvent limitée par les possibilités d'extension des dimensions extérieures du bâtiment**.

Les **ponts thermiques** sont dus à des contraintes constructives ou géométriques. Ils peuvent avoir un impact sur la performance thermique, constituer des voies de transfert direct, mais aussi entraîner des effets de condensation de vapeur, ce qui peut altérer le comportement physique des matériaux. **De par sa fonction d'enveloppe, l'approche AIM-ES offre la possibilité d'éliminer les ponts thermiques sur la façade existante**, y compris au niveau des balcons, qui peuvent être inclus dans l'espace chauffé. Des simulations thermiques aideront le concepteur à localiser les ponts thermiques existants, à décrire leurs caractéristiques et à éviter qu'un différentiel d'isolation entre la nouvelle façade très isolée et l'ancienne structure ne crée de nouveaux ponts thermiques (figure 23). Les simulations réalisées en phase d'investigation pourront être utilisées pour cette procédure d'évaluation.

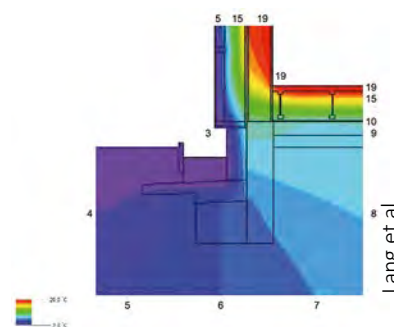
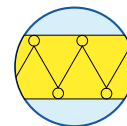


Fig. 23 Exemple de simulation thermique visant à évaluer le risque de ponts thermiques ([Pettenbach](#)) [62].

L'isolation et l'étanchéité à l'air, combinées à des stratégies de ventilation bien étudiées, sont essentielles pour obtenir une enveloppe de bâtiment hautement efficace. Si l'isolation est la capacité de l'enveloppe à limiter les déperditions calorifiques par conduction thermique, l'étanchéité à l'air traduit la quantité d'air pouvant entrer ou sortir du bâtiment directement à



travers l'enveloppe, sous une pression d'air différentielle spécifique. À noter qu'**un bâtiment bien isolé n'est pas nécessairement étanche à l'air**. Une conception efficace de l'étanchéité à l'air permettra :

- d'améliorer l'efficacité énergétique du bâtiment en garantissant un contrôle optimal des infiltrations et des exfiltrations d'air
- d'améliorer le confort des occupants en réduisant les courants d'air intérieurs
- d'éviter que l'humidité provenant d'une pièce ne pénètre rapidement dans la structure, entraînant des dégâts par condensation interne.

Toutefois, accroître l'étanchéité à l'air d'un bâtiment sans en analyser l'impact sur les équilibres au sein de sa structure peut donner lieu à de graves problèmes, tels que de la condensation sur les murs intérieurs ou une baisse de la qualité de l'air intérieur. L'humidité et les polluants résultant de la présence et des activités humaines doivent être évacués au moyen d'un système de ventilation correctement conçu (voir § 4.5.2.1, p. 68). Pour évaluer l'étanchéité à l'air du bâtiment avant ou après la pose des modules de façade, un test de pressurisation peut être réalisé conformément à la norme NBN EN ISO 9972 [25]. Dans le cas d'une construction neuve, il est généralement recommandé de réaliser ce test après la pose de l'isolation, mais avant la pose des finitions, afin de pouvoir corriger les fuites éventuelles. Bien conçue, la méthode AIM-ES permet d'améliorer considérablement l'étanchéité à l'air du bâtiment. **Si les finitions intérieures sont en bon état, les mesures d'amélioration porteront principalement sur les jonctions des menuiseries extérieures.**

Un autre aspect important relatif au déplacement d'air est le **risque de pénétration du vent au travers des éléments de la nouvelle enveloppe**, qui peut entraîner une diminution importante de leurs performances (risques de ponts thermiques et de condensation interne). Si aucune mesure technique n'est prévue pour la protection contre le vent, un bâtiment rendu étanche à l'air au moyen de modules AIM-ES (fuites d'air limitées depuis l'intérieur) peut encore être confronté à une baisse de performance en raison de l'infiltration d'air extérieur à travers les modules et/ou à travers les raccords entre modules.

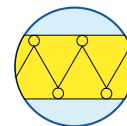
Le lecteur trouvera de nombreuses informations à propos de l'étanchéité à l'air dans la **Note d'information technique n° 255** du CSTC [43].

B. *Diminuer les besoins en climatisation*

Il existe plusieurs façons de diminuer les risques de surchauffe en été en présence d'une façade-manteau AIM-ES correctement conçue. Même si l'investigation du bâtiment n'a pas révélé de problèmes, celui-ci peut néanmoins être le siège d'une **surchauffe en raison de la performance thermique élevée de la nouvelle enveloppe**. Des simulations numériques peuvent aider l'équipe de conception à choisir les solutions adéquates pour garantir le confort des occupants en été, qu'il s'agisse de protections solaires adaptées ou d'une stratégie de ventilation efficace.

C. *Modifier les apports d'énergie*

Un dernier point de la conception 'basse énergie' touche à la modification des apports d'énergie dans le bâtiment. En la matière, la solution AIM-ES permet de mieux valoriser le rayonne-



ment direct du soleil. Des châssis performants peuvent être intégrés aux nouveaux éléments de façade et peuvent être munis de dispositifs de contrôle des apports solaires (voir § 4.5.1.2, p. 65). La préfabrication en atelier permet en fait d'intégrer de manière optimisée divers systèmes de production, d'accumulation ou de distribution d'énergie dans la nouvelle enveloppe. Les technologies solaires, passives ou actives, en sont un exemple courant (voir § 4.5.2.2, p. 72).

4.2.1.2 Résistance à l'humidité

La présence d'humidité dans les matériaux peut accélérer leur dégradation (cycles de gel-dégel, biodégradation, efflorescences, etc.) et diminuer sensiblement leur performance thermique, acoustique et structurale. De plus, la présence d'humidité à l'intérieur des murs ou à leur surface peut provoquer des problèmes d'hygiène. C'est pourquoi il est nécessaire d'inclure **plusieurs mesures de protection contre l'humidité** dans la conception des modules de façade préfabriqués.

On distingue six causes principales d'humidification d'un matériau de construction :

1. apport d'eau de construction, y compris l'eau accumulée pendant les travaux sur chantier en raison d'une mauvaise protection contre les intempéries
2. pénétration directe par absorption sous l'effet d'une fuite ou de fortes pluies
3. absorption capillaire en cas de contact direct avec un milieu humide
4. condensation interne au mur
5. condensation superficielle
6. hygroscopicité de certains sels.

On pourra éviter chacun de ces phénomènes en prenant des mesures appropriées. Il convient tout d'abord de souligner que **la mise en œuvre d'une nouvelle enveloppe ne peut en aucun cas être entreprise tant que la cause des désordres n'est pas identifiée et traitée** (voir la **Note d'information technique n° 252** du CSTC) [42]. Si des phénomènes tels que des infiltrations peuvent être résolus par la pose de la nouvelle enveloppe, d'autres nécessiteront des mesures préalables au montage des modules, faute de quoi ils risquent de s'aggraver.

Le tableau 5 (p. 40) présente les principaux aspects de la conception des modules AIM-ES à évaluer pour garantir la protection contre l'humidité, pour autant que les causes d'humidification soient éliminées et que le bâtiment ait pu sécher suffisamment.

4.2.2 ACOUSTIQUE

Les nouveaux murs extérieurs doivent respecter des critères de **protection contre les bruits aériens et contre les bruits de choc**. Ces bruits peuvent provenir soit de l'extérieur (bruits de la rue, d'activités industrielles, de la pluie, etc.), soit de l'intérieur de l'immeuble (logements voisins, installations techniques, etc.). Il est essentiel d'étudier toutes les sources potentielles de bruit. **Si l'on conçoit une solution AIM-ES en se limitant à l'isolation acoustique extérieure, on risque d'accroître l'inconfort des occupants**, car les bruits provenant de l'intérieur sembleront plus forts qu'avant la rénovation.

On évitera la transmission des bruits aériens en calfeutrants les orifices et les joints de manière appropriée [65]. Quant aux bruits de structure (chocs ou fonctionnement d'éléments inté-

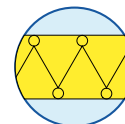


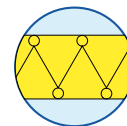
Tableau 5 Points à prendre en considération pour garantir la protection contre l'humidité : risques potentiels et solutions envisageables.

Risques	Points de vigilance
Eau de construction dans les modules	<ul style="list-style-type: none">• Protéger correctement les modules contre les intempéries pendant le transport, le stockage sur chantier et le montage.• Prévoir un temps de séchage suffisant en cas d'utilisation d'eau pour la mise en œuvre des matériaux.
Condensation interne dans les modules	<ul style="list-style-type: none">• Empêcher l'humidité de l'air intérieur de pénétrer dans les modules.• Éviter les voies de transfert direct amenant de l'air extérieur froid à l'intérieur des murs.• Éviter les ponts thermiques.• Poser, si nécessaire, une membrane étanche à la vapeur.• Concevoir correctement la protection contre le vent entre les éléments (joints, ruban adhésif, etc.).
Condensation interne dans des conduites intégrées	<ul style="list-style-type: none">• Éviter les ponts thermiques, garantir une bonne isolation périphérique des conduites.
Condensation superficielle	<ul style="list-style-type: none">• Éviter les ponts thermiques.• Concevoir correctement la protection contre le vent autour des ouvertures.• Concevoir correctement le système de ventilation, en particulier si l'étanchéité à l'air a été sensiblement améliorée.
Remontées capillaires en pied de mur	<ul style="list-style-type: none">• Traiter les phénomènes d'absorption capillaire dans les murs existants.• Empêcher le transfert d'eau entre les matériaux et le sol (par exemple, en plaçant une barrière à l'humidité entre la partie inférieure des murs et les modules).
Absorption de projections d'humidité en pied de mur	<ul style="list-style-type: none">• Concevoir correctement les fondations.• Surélever les fondations si nécessaire.• Bien concevoir les détails des membranes.
Absorption par le revêtement de l'eau provenant de pluies battantes	<ul style="list-style-type: none">• Concevoir correctement le système de revêtement.• Prévoir, si nécessaire, un pare-pluie approprié (dans le cas d'un revêtement ajouré, par exemple).• Assurer des possibilités de séchage des surfaces extérieures.
Absorption de l'eau provenant de pluies battantes autour des baies de portes et de fenêtres	<ul style="list-style-type: none">• Concevoir correctement les portes et les fenêtres en prévoyant une évacuation efficace de l'eau de pluie et une protection appropriée pour éviter les infiltrations.

grés), on empêchera leur transmission en prévoyant une coupure acoustique entre les éléments constructifs. La composition de l'ensemble de la façade doit être prise en considération, depuis la surface intérieure jusqu'à la surface extérieure. Comme pour la transmission thermique, la position horizontale de la fenêtre à l'intérieur de la couche d'isolation principale du module joue un rôle essentiel dans la performance finale.

Les normes suivantes sont utiles pour la conception acoustique des modules AIM-ES :

- NBN S 01-400-1 : critères acoustiques pour les immeubles d'habitation [31]
- NBN S 01-401 : valeurs limites des niveaux de bruit en vue d'éviter l'inconfort dans les bâtiments [32]
- NBN EN ISO 717-1 : évaluation de l'isolement des immeubles et des éléments de construction aux bruits aériens [23]
- NBN EN ISO 717-2 : évaluation de l'isolement des immeubles et des éléments de construction aux bruits de choc [24]
- NBN EN ISO 12354-1 : calcul de la performance acoustique des bâtiments à partir de la per-



formance des éléments [27]

- NBN EN ISO 12354-2 : calcul de l'isolement aux bruits de choc entre locaux à partir de la performance des éléments [28]
- NBN EN ISO 12354-3 : calcul de l'isolement aux bruits aériens venus de l'extérieur à partir de la performance des éléments [29].

4.2.3 SÉCURITÉ INCENDIE

4.2.3.1 Principes de base

A. Résistance au feu

La résistance au feu concerne les éléments de construction et leur aptitude à conserver, pendant une durée déterminée, la stabilité au feu, l'étanchéité au feu, l'isolation thermique et/ou toute autre fonction exigée :

- la stabilité au feu (critère 'R') est le critère selon lequel est déterminée l'aptitude de l'élément ou de la structure à supporter des charges et/ou des actions spécifiées
- l'étanchéité aux flammes (critère 'E') permet de déterminer l'aptitude d'un élément séparatif exposé au feu d'un seul côté à empêcher les flammes et les gaz chauds de le traverser; cette fonction est parfois qualifiée de pare-flamme
- l'isolation thermique (critère 'I') correspond, quant à elle, à l'aptitude d'un élément séparatif à prévenir le passage de la chaleur. La transmission doit être limitée de façon à ne pas enflammer la surface non exposée ni aucun élément au voisinage immédiat de celle-ci.

Un élément doit remplir les fonctions qui lui sont attribuées : capacité portante, séparation ou les deux à la fois. En Belgique, à l'heure actuelle, on peut évaluer la résistance au feu par essai sur une configuration spécifique, par calcul ou par analogie. Les normes applicables sont en général classées par famille selon le type de test et le type de produit. Le concepteur doit choisir la méthode d'essai adéquate pour le composant à tester en se basant sur les exigences générales (NBN EN 1363-1) [7]. Les méthodes permettant de déterminer la résistance au feu par calcul sont données dans les Eurocodes pour différents types de structures.

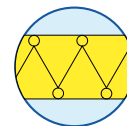
B. Réaction au feu

La réaction au feu fait référence à un matériau et à sa **capacité à alimenter le feu**. Il s'agit d'une propriété particulièrement importante pour les matériaux de revêtement. La classification européenne de réaction au feu distingue sept classes principales de réaction au feu (A1, A2, B, C, D, E et F), auxquelles s'ajoutent :

- la classe s pour le dégagement de fumée (s1 et s2 pour les revêtements de sol; s1, s2 et s3 pour les autres produits de construction)
- la classe d pour les gouttelettes et particules en feu (d0, d1 et d2 pour tous les produits, sauf les revêtements de sol).

4.2.3.2 Cadre réglementaire

La monographie du CSTC '[Sécurité incendie des façades de bâtiments multiétagés](#)' [69] déve-



loppe largement le cadre réglementaire général en matière de sécurité incendie. Rappelons qu'en Belgique, c'est l'arrêté royal du 7 juillet 1994 et ses amendements ⁽⁴⁾ [84] qui définissent les normes de base pour la prévention des incendies dans les bâtiments. Cet arrêté royal, appelé ci-après AR 'normes de base', n'a pas de caractère contraignant pour la rénovation, excepté pour les extensions de bâtiments existants ⁽⁵⁾. Ces textes seront néanmoins utilisés comme référence par les services d'incendie locaux, même en cas de rénovation, au moment de formuler leur avis sur la sécurité incendie d'un bâtiment.

L'AR distingue trois types de bâtiment selon leur hauteur h . Les considérations relatives à la sécurité incendie sont étroitement liées à cette catégorisation. La hauteur h est définie comme la distance entre le niveau fini du plancher le plus élevé et le niveau le plus bas des chemins d'accès pouvant être utilisés par les services d'incendie. Selon la hauteur, on distingue :

- les bâtiments bas ($h < 10$ m)
- les bâtiments moyens ($10 \leq h \leq 25$ m)
- les bâtiments élevés ($h > 25$ m).

4.2.3.3 Aspects de la sécurité incendie importants pour les modules AIM-ES

L'AR 'normes de base' ne s'applique pas aux bâtiments existants, même si le concepteur doit s'efforcer d'améliorer autant que possible le niveau de sécurité. En cas de demande de permis de bâtir, les services d'incendie locaux formuleront un avis (à caractère contraignant) au sujet des mesures de protection contre l'incendie appliquées dans le bâtiment et s'appuieront, pour ce faire, sur l'arrêté royal. Par conséquent, les nouveaux éléments de façade ne peuvent en aucun cas affecter la sécurité incendie existante.

Dans ce cadre, il convient de vérifier les choix de conception des modules AIM-ES en ce qui concerne :

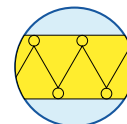
- la réaction au feu des matériaux choisis
- la résistance au feu des assemblages
- les détails d'assemblage, y compris les équipements techniques intégrés et la couche d'adaptation.

La façade AIM-ES peut être portante ou non, et assure une fonction de séparation. La nouvelle façade recouvre la face extérieure du bâtiment et relie les étages verticalement. Pour cette raison, il est essentiel que la progression du feu ne soit pas favorisée par les matériaux ou la structure du nouveau système de façade, ni par les systèmes intégrés. Trois voies de propagation du feu doivent être étudiées en vue de concevoir une solution conforme à la sécurité incendie (figure 24, p. 43) :

1. propagation du feu par la surface du revêtement extérieur; cette voie de propagation peut être limitée par un choix adéquat des matériaux de revêtement du module AIM-ES
2. propagation du feu d'un compartiment à l'autre (d'étage à étage, par exemple); cette pro-

⁽⁴⁾ Voir la page de l'Antenne Normes Prévention du feu sur https://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=services&sub=standards_regulations&pag=fire&art=standards_and_regulations&niv01=belgian_fire_safety_requirements&niv02=base_standards

⁽⁵⁾ Les modules de façade préfabriqués de type TES peuvent être utilisés pour accroître le volume du bâtiment existant, soit verticalement en ajoutant un étage ou en transformant le dernier niveau existant, soit horizontalement en créant de nouveaux espaces.



pagation s'opère soit via l'extérieur, lorsque les flammes s'échappent de la façade en passant, par exemple, par des éléments vitrés non résistant au feu (voie 2a à la figure 24), soit au droit du raccord entre les élément AIM-ES et le mur existant, au niveau de la couche d'adaptation (voie 2b). Pour se prémunir contre ces dangers, le concepteur devra veiller à la résistance au feu des différentes jonctions et de la façade rénovée au droit du plancher. La résistance des ancrages des éléments de façade est également cruciale

- pénétration du feu dans l'élément AIM-ES, suivie d'une propagation incontrôlée à l'intérieur de sa structure (par le biais des composants combustibles) ou derrière le système de revêtement (avec un possible effet de cheminée). Plusieurs voies de transmission sont présentées à la figure 24 à titre d'illustration; la voie 3a est particulièrement critique et devra être étudiée scrupuleusement.

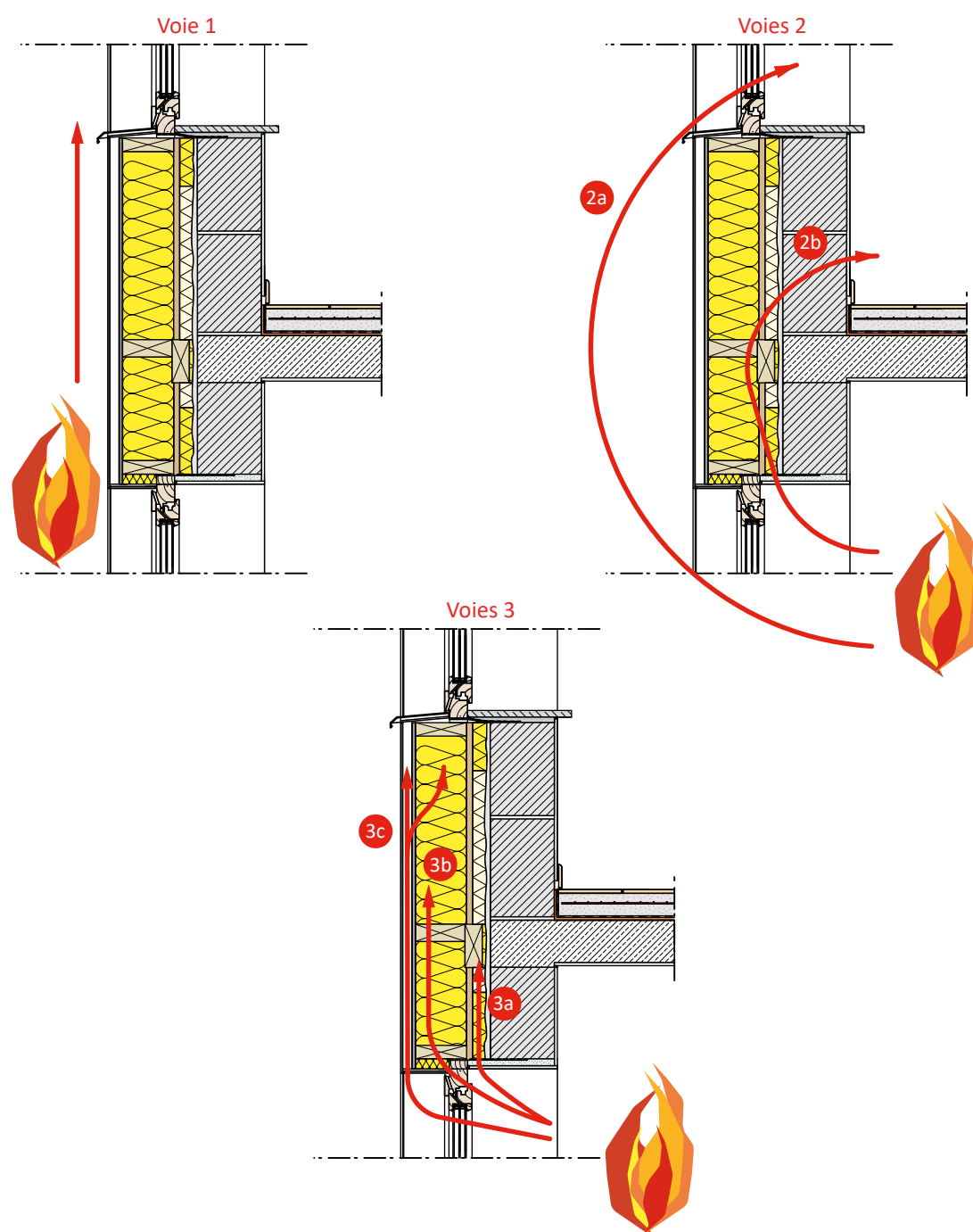
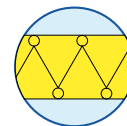


Fig. 24 Voies de propagation potentielle d'un incendie à prendre en considération pour concevoir un ensemble résistant au feu (source : CSTC).



Les exigences définies dans l'AR 'normes de base' pour **se prémunir contre le risque lié à la voie n° 1** portent sur la réaction au feu du revêtement de façade. Dans les bâtiments bas, les matériaux de revêtement doivent présenter une classe de réaction au feu D-s3, d1. Dans les bâtiments moyens et élevés, l'exigence correspond à la classe B-s3, d1. Il est important de préciser que ces niveaux doivent être respectés pour le produit de revêtement dans ses conditions de mise en œuvre réelle. Pour un bardage, par exemple, les exigences de réaction au feu s'appliquent au système complet, à savoir le bardage lui-même, la lame d'air ventilée, le panneau éventuellement situé à l'arrière de celle-ci, l'isolant éventuel et les éléments de fixation.

Afin de limiter le risque de propagation verticale ou horizontale du feu entre les compartiments le long de la façade (voies de propagation n° 2), l'AR 'normes de base' prévoit des prescriptions spécifiques. En premier lieu, en ce qui concerne le **risque de propagation entre deux compartiments via l'extérieur** (2a), pour les bâtiments moyens et élevés, il y a lieu de respecter au moins une des conditions suivantes :

1. la façade doit présenter une étanchéité au feu E 60 et la somme des dimensions a, b, c et d représentées à la figure 25 (p. 45) doit être au moins égale à 1 m. Un schéma semblable est repris dans l'AR pour la propagation horizontale du feu, avec les prescriptions correspondantes
2. la façade doit être caractérisée soit par une résistance au feu E 30 sur toute sa hauteur, soit par un niveau E 60 tous les deux étages
3. les compartiments en contact avec la façade doivent être équipés de sprinkleurs (NBN EN 12845) [12].

Pour la première solution, les systèmes AIM-ES peuvent satisfaire au critère de l'arrêté royal moyennant un choix de matériau et une conception appropriés. Il convient cependant d'éviter les voies de propagation directe de l'incendie, par exemple à travers la couche d'adaptation comme indiqué à la figure 24 (p. 43). Si le bâtiment existant satisfait déjà au critère de 1 mètre exigé par l'AR, il demeure essentiel d'identifier tous les risques de propagation directe pouvant survenir à la suite de l'installation de la façade AIM-ES, et d'y parer au moyen d'une conception appropriée.

Pour **limiter le risque de propagation interne de l'incendie** (voie 2b à la figure 24), la jonction entre les éléments de compartiment (planchers, par exemple) et la façade AIM-ES doit au moins présenter une résistance au feu EI 60, sauf dans le cas d'un bâtiment bas. Dans un bâtiment moyen ou élevé, les ancrages de fixation des éléments AIME-ES devront présenter une résistance au feu R 60 ou du moins être protégés vis-à-vis d'un incendie provenant d'un compartiment inférieur attenant [69].

À l'heure actuelle, les risques de propagation de l'incendie au sein même du système de façade (voies de propagation n° 3, figure 24) ne peuvent pas être évalués directement selon les normes d'essais européennes. Ils ne sont donc pas couverts explicitement par des exigences réglementaires en Belgique. Le service d'incendie peut cependant suggérer des recommandations en la matière dans le cadre de son avis lié à la demande de permis [69].

Outre son rôle isolant, le nouveau système de façade peut être utilisé pour intégrer des conduits et des câbles. On peut ainsi rénover d'anciennes installations sans travaux majeurs à l'intérieur du bâtiment. Toutefois, il est essentiel d'**analyser les risques que comportent ces nouvelles voies linéaires, qui altèrent souvent le compartimentage du bâtiment** (propagation

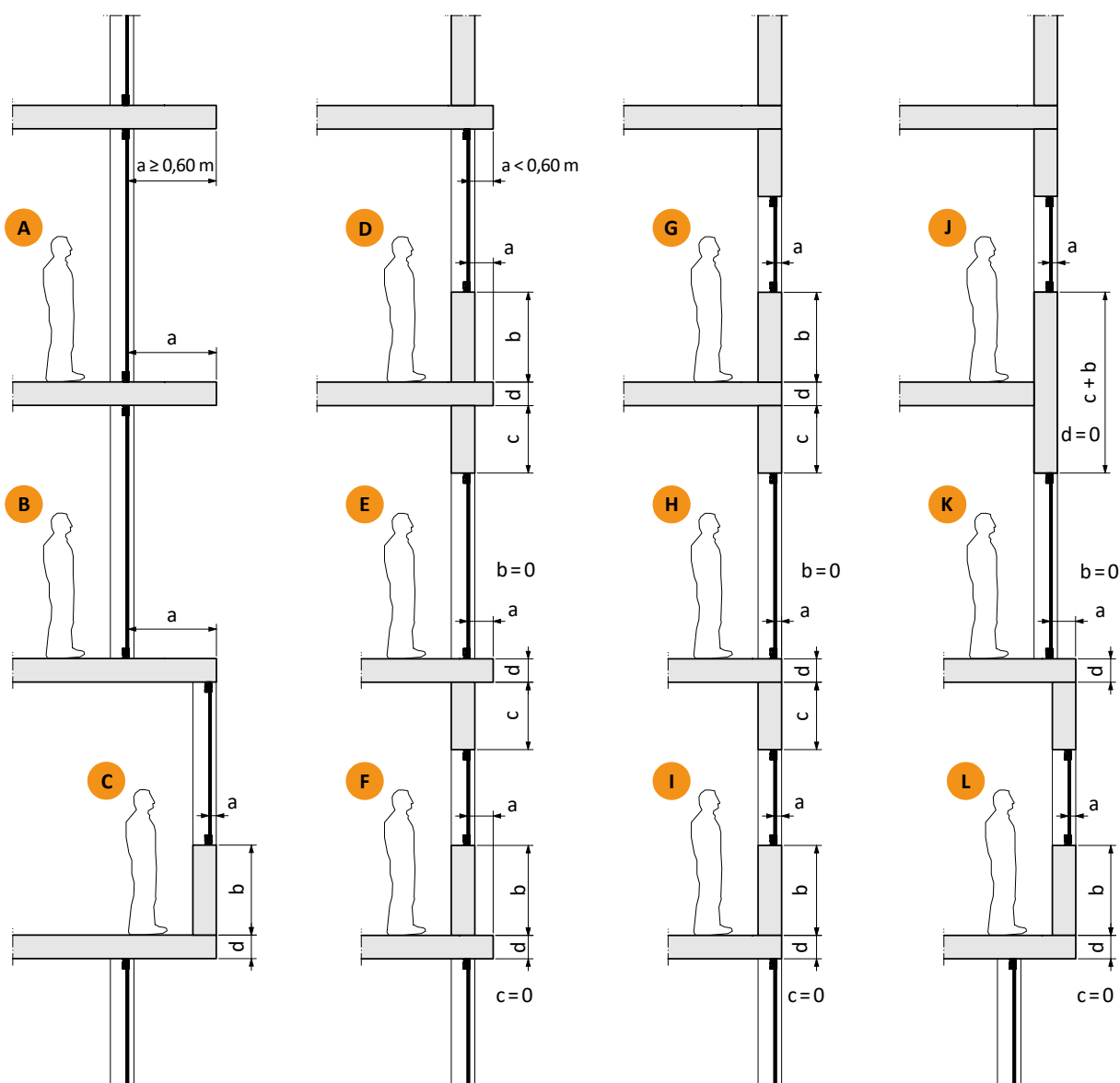
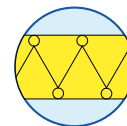
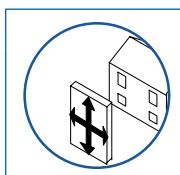


Fig. 25 Constructions diverses et manières de calculer le 'mètre résistant' (propagation verticale)
(source : AR 7/7/94) [84].

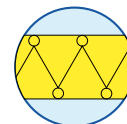
directe de l'incendie). L'AR 'normes de base' formule une série de prescriptions à cet égard. Le concepteur devra souvent prévoir des dispositifs spécifiques pour respecter ces exigences (ajout d'un registre coupe-feu à une conduite traversant un mur pour lequel une résistance EI 60 est requise, par exemple).

4.3 PRINCIPE, FORME ET FONCTION DES MODULES




QUESTION CLÉ

Quelles sont les caractéristiques générales des modules de façade (principe de construction, dimensions courantes, orientation et rôle qu'ils peuvent jouer pour améliorer les performances du bâtiment et la qualité de vie des utilisateurs) ?



4.3.1 TYPE DE SYSTÈME

QUESTIONS CLÉS	
<ul style="list-style-type: none">• Quel est le type de système (fermé ou ouvert) à privilégier ?• L'utilisation d'un panneau arrière présente-t-elle un avantage ?	
INFORMATIONS UTILES	
Provenant de la programmation	
<ul style="list-style-type: none">• Sur le plan légal : exigences en matière de sécurité incendie, de performance énergétique (valeur U), de physique du bâtiment• Objectifs : qualité environnementale prévue, extension prévue du volume du bâtiment, durée prévue des opérations sur chantier	
Provenant de l'investigation	
	<ul style="list-style-type: none">• Type de structure du bâtiment• Hauteur du bâtiment• Présence de grandes irrégularités sur la façade existante• Capacité portante des fondations et de la structure existantes• État des murs existants• Comportement hygrothermique des murs existants et problèmes d'humidité constatés

On distingue essentiellement deux types de modules AIM-ES : le **système ouvert** et le **système fermé**. Le système fermé est muni d'une face arrière plane. Il se compose d'une structure fermée en usine par des panneaux ou est caractérisé par une configuration en panneaux sandwichs. Une **couche d'adaptation indépendante** est nécessaire pour remplir l'espace vide entre la nouvelle enveloppe et le mur existant (voir § 4.4.2, p. 54). Un exemple décrit en détail est celui du système TES fermé (figure 26) : une structure en bois est fermée des deux côtés à l'aide de panneaux de revêtement; la principale couche d'isolation du module est presque toujours appliquée en usine. Ces modules TES fermés possèdent souvent une capacité portante très similaire à celle d'un bâtiment neuf.

Le **système ouvert se compose d'une structure dépourvue de panneau arrière** lorsqu'il est installé contre les murs existants. La couche d'isolation est injectée *in situ* et absorbe les irrégu-

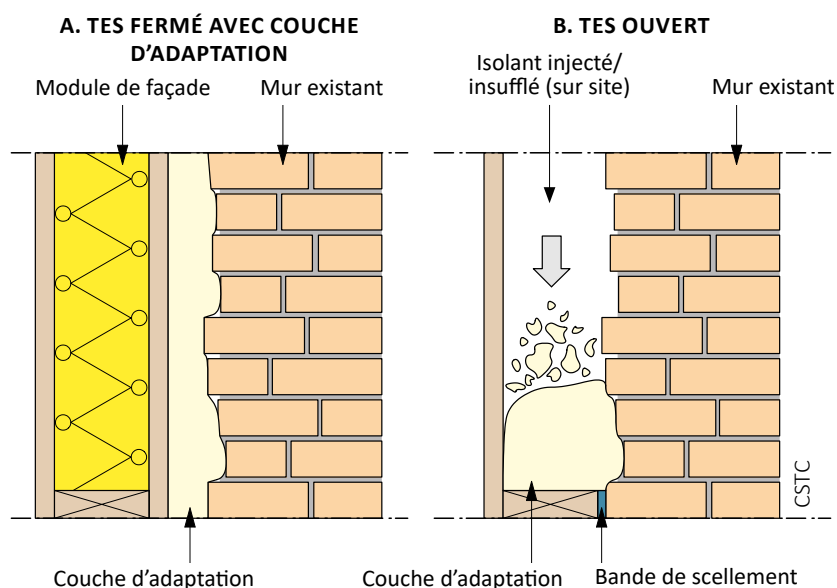
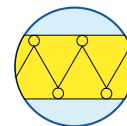


Fig. 26 Types de modules à base de bois.



larités du mur. Les éléments d'adaptation se limitent à quelques dispositifs de confinement ou d'étanchéité (bande de compression, par exemple) sur les bords arrière du cadre du module et autour des éléments de fenêtre, pour éviter les fuites pendant l'injection de l'isolant. Les modules TES ouverts constituent un bon exemple d'un tel système, puisqu'il n'y a pas de panneau de revêtement à l'arrière de la structure en bois. Après la fixation du module sur le mur existant et l'application d'une étanchéité adéquate sur les chants arrière de l'ossature en bois, l'isolation est injectée par des orifices préforés en usine.

Les principaux avantages du système ouvert résident dans le **processus d'égalisation simplifié** et dans le **poids réduit des modules** avant montage. Cependant, le système se caractérise par une plus grande segmentation de la phase d'assemblage, qui peut prolonger la durée des opérations sur chantier. Une inspection thermographique peut également s'avérer nécessaire pour vérifier la conformité de l'insufflation d'isolant. En effet, l'obstacle majeur à la préfabrication poussée des systèmes ouverts est lié à l'accessibilité des orifices pour l'insufflation de l'isolant. Du côté intérieur, ces orifices ne peuvent être forés qu'autour des châssis de fenêtre; depuis l'extérieur, le système de revêtement doit être en partie complété ou entièrement assemblé sur chantier, ce qui aura un impact sur la durée des travaux. Ces opérations peuvent également nuire à la qualité de la rénovation, dans la mesure où les dispositifs de protection contre le vent et/ou l'humidité ne seront pas contrôlés en usine.

Pour le bâtiment rénové à Kapfenberg, les auteurs de projet ont eu recours à un **système hybride** constitué d'une structure à base de bois fermée à l'arrière par une membrane étanche à la vapeur (figure 27) et remplie d'isolant en vrac en usine. Lors du montage sur chantier, la combinaison isolant/membrane est comprimée contre les murs existants pour absorber leurs irrégularités.



Fig. 27 Système hybride utilisé à Kapfenberg [52].

Le tableau 6 (p. 48) présente une synthèse des avantages et inconvénients du système ouvert et du système fermé.

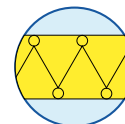
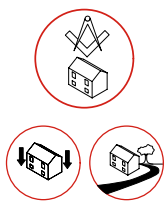


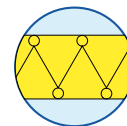
Tableau 6 Avantages et inconvénients des systèmes ouverts ou fermés.

<p>1. Le système fermé nécessite des couches supplémentaires (panneaux de revêtement arrière, couche d'adaptation, etc.), ce qui exige :</p> <ul style="list-style-type: none">• davantage de détails• une analyse du cycle de vie et du coût des couches supplémentaires• un contrôle de l'impact que peut avoir le poids supplémentaire des modules sur la livraison, la manipulation, etc. (à relativiser compte tenu de l'attention que requiert un système ouvert pour assurer l'étanchéité à la vapeur autour des baies).
<p>2. Le système ouvert est souvent caractérisé par un niveau de préfabrication moindre. Il en résulte :</p> <ul style="list-style-type: none">• un contrôle de qualité moins approfondi• une segmentation parfois plus importante du travail sur chantier pour la mise en œuvre du revêtement extérieur (mais les systèmes fermés nécessitent une mise en œuvre plus complexe de la couche d'adaptation)• moins de risques de dégradation de l'isolant par l'humidité lors du transport et du stockage des modules• une meilleure adaptation potentielle aux chaînes d'assemblage simples.
<p>3. Le système ouvert est associé à l'injection d'un produit isolant, ce qui nécessite :</p> <ul style="list-style-type: none">• de prévoir et de forer des orifices d'injection• de garantir l'accessibilité des orifices soit depuis l'intérieur, ce qui entraîne des nuisances pour les occupants, soit depuis l'extérieur, ce qui empêche la préfabrication complète de la couche extérieure du module• de veiller à la mise en œuvre adéquate de l'isolation• dans le cas de la cellulose, de respecter des exigences plus strictes en matière de sécurité incendie.

4.3.2 PARAMÈTRES GÉOMÉTRIQUES

QUESTIONS CLÉS	
<ul style="list-style-type: none">• Comment les modules sont-ils agencés autour du bâtiment existant ?• Quelles sont leurs dimensions courantes (dans le plan de la façade) et leur orientation ?	
INFORMATIONS UTILES	
Provenant de la programmation	
<ul style="list-style-type: none">• Sur le plan légal : exigences en matière de sécurité incendie et de performance énergétique (étanchéité à l'air)• Objectifs : aspect visuel recherché, durée prévue de la phase chantier, extension prévue du volume du bâtiment	
Provenant de l'investigation	
	<ul style="list-style-type: none">• Forme du bâtiment• Nombre d'étages• Grille de construction ou de distribution des éléments structurels et fonctionnels (hauteur d'étage, position de la poutre de ceinture, axe de symétrie, alignement des ouvertures, etc.)• Espace disponible pour l'accès des véhicules de transport et pour la manipulation des modules• Capacité portante des dalles de plancher

Parallèlement à la détermination du système le plus approprié, une étape importante dans le processus de conception des systèmes AIM-ES consiste à définir les paramètres géométriques généraux des modules : le fait de **pouvoir choisir leur orientation et leurs dimensions permet d'adapter facilement le système de façade préfabriqué au bâtiment existant**. En ce qui concerne les exigences de sécurité incendie et de stabilité, lorsque plusieurs solutions peuvent être envisagées, l'équipe de conception devra opter pour la solution limitant le travail sur et



hors chantier. Par exemple, les baies devront être alignées à l'intérieur de chaque module, de manière à limiter la complexité de l'ossature en bois et le travail que cela engendrera pendant la fabrication en usine (figure 30).



Fig. 28 Orientation horizontale des modules à Augsburg [78].



Fig. 29 Rôle joué par la forme particulière du bâtiment (balcons complexes) dans le choix de l'orientation verticale des modules (illustration : Berlin) [80].

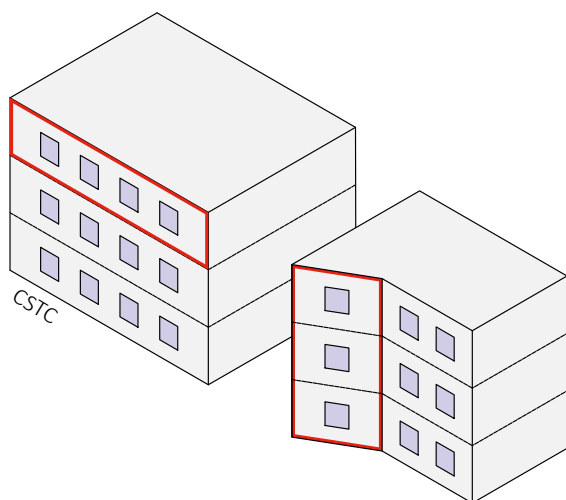


Fig. 30 Influence de la distribution des fenêtres et de la forme du bâtiment sur le choix de l'orientation du module.

Pour déterminer les paramètres géométriques optimaux, il convient d'étudier attentivement les lignes constructives du bâtiment existant [65] (axes de symétrie, hauteur d'étage, poutres de ceinture, etc.) ainsi que les limites imposées par l'accessibilité du chantier et les équipements disponibles pour la production, le transport ⁽⁶⁾ et l'installation des modules. Par exemple, l'orientation verticale nécessitera un basculement des modules après leur livraison sur chantier; le poids des modules et les possibilités de manipulation joueront alors un rôle essentiel. S'il existe des restrictions au niveau de l'espace disponible pour de grands appareils de levage, il convient d'envisager l'usage de modules ouverts en raison de leur poids moins élevé.

⁽⁶⁾ Dans la plupart des cas, la taille maximum d'un module est limitée à 13 x 3,8 m (restrictions liées au transport).

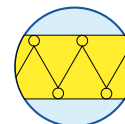


Tableau 7 Orientation verticale ou horizontale : avantages et inconvénients.

<p>1. Pour un bâtiment large ne dépassant pas 12 m de hauteur (4 étages), l'usage de modules horizontaux nécessitera des joints horizontaux et verticaux entre les éléments, alors que des modules verticaux n'entraîneront que des joints verticaux; les modules horizontaux requièrent donc :</p> <ul style="list-style-type: none">• davantage de détails• davantage d'aspects à contrôler sur chantier• un plus grand travail d'alignement pendant le montage.
<p>2. Les modules verticaux s'étendent sur plusieurs étages; dès lors :</p> <ul style="list-style-type: none">• une approche plus complexe est requise pour le contrôle de la propagation verticale du feu• le support de la charge se situe souvent à la base, car il est plus difficile de distribuer des charges verticales à chaque étage.
<p>3. Les modules verticaux nécessitent un basculement avant le montage, ce qui exige :</p> <ul style="list-style-type: none">• un plus grand espace de manipulation• un équipement adapté.

4.3.3 EXTENSION DU VOLUME DU BÂTIMENT

QUESTIONS CLÉS	
<ul style="list-style-type: none">• Comment les occupants utilisent-ils les espaces extérieurs existants (balcons, terrasses) ?• Est-il souhaitable d'accroître le volume du bâtiment ?• Quelles seraient les conséquences d'une extension du bâtiment sur la sécurité incendie et la stabilité ?• L'éventuel accroissement du volume protégé remet-il en question le dimensionnement des systèmes de chauffage ?	
INFORMATIONS UTILES	
Provenant de la programmation	
<ul style="list-style-type: none">• Sur le plan légal : exigences en matière de sécurité incendie, de performance énergétique (impact de la compacité du bâtiment), possibilités urbanistiques d'extension du bâtiment• Objectifs : aspect visuel recherché, nombre de logements prévus, durée prévue de la phase chantier	
Provenant de l'investigation	
	<ul style="list-style-type: none">• Forme du bâtiment• Nombre d'étages• Exigences de l'AR 'normes de base' selon la hauteur du bâtiment• Compacité du bâtiment• Grille de construction ou de distribution des éléments structurels et fonctionnels• Espace disponible pour l'accès des véhicules de transport et pour la manipulation des modules• État des balcons et des toitures• Présence de ponts thermiques importants au droit des balcons• Réserve de capacité portante des éléments structurels

En Europe, les mesures de planification urbanistique ont récemment remis en avant la nécessité de densifier l'environnement urbain existant. Cela passe par l'extension des espaces habités existants. L'utilisation d'éléments d'enveloppe préfabriqués porteurs offre un large potentiel de modification et/ou d'extension de l'espace. Ce thème est étudié en détail dans le second rapport du projet smartTES consacré aux modules AIM-ES à base de bois [46].

Les constructions légères en bois recèlent en effet de nombreuses possibilités de transformer radicalement l'aspect architectural d'un bâtiment. La rénovation à l'aide d'un système AIM-ES

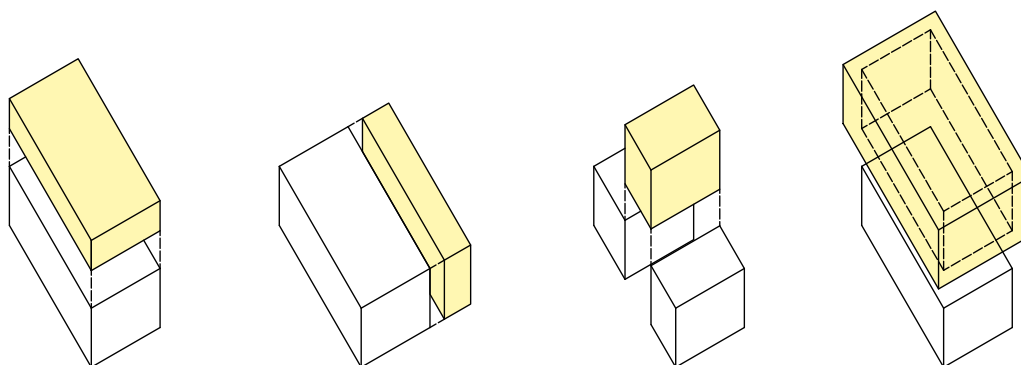
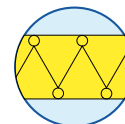


Fig. 31 Possibilités d'extension du volume d'un bâtiment à l'aide des systèmes AIM-ES (adapté de F. Lattke) [65].

pourrait être considérée comme un empilement uniforme d'éléments de façade, mais elle offre en réalité aux propriétaires et aux architectes un large éventail de solutions pour restructurer les façades et recomposer les volumes (figure 32) :

- extensions verticales : ajout d'un étage, aménagement d'un grenier, etc.
- extensions horizontales : intégration d'anciens balcons dans le volume chauffé, création de nouveaux balcons, etc.
- extension par 'remplissage' entre plusieurs volumes existants.

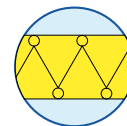


Fig. 32 L'exemple de Zurich (avant/après) montre comment la solution AIM-ES peut donner vie à une composition architecturale intéressante [50].

Parmi les cas européens étudiés, l'intégration des balcons existants dans le volume chauffé constitue la transformation spatiale la plus fréquente (figure 33), suivie de l'ajout d'un étage. Diverses solutions existent pour permettre aux occupants de profiter d'un espace de vie communiquant avec l'extérieur : transformation de balcons existants en jardins d'hiver, comme à Augsburg; fixation de nouveaux balcons aux éléments AIM-ES, comme dans le projet Kapfenberg.



Fig. 33 Intégration de balcons à Berlin [80].



4.4 COMPOSITION DES MODULES COUCHE PAR COUCHE



QUESTIONS CLÉS

- Comment concevoir les différentes couches qui composent les modules de façade ?
- Comment choisir les matériaux et le type d'assemblage ?

Un module de façade AIM-ES se compose de plusieurs couches, chacune jouant un ou plusieurs rôles : rôle structurel, isolation thermique, sécurité incendie, étanchéité à l'air, fonction esthétique, etc. Pour les systèmes fermés, les couches sont généralement assemblées comme illustré à la figure 34.

Avec les systèmes ouverts, la conception de la couche d'adaptation se limite à quelques zones spécifiques, car les irrégularités de la façade sont principalement absorbées par la couche d'isolation insufflée.

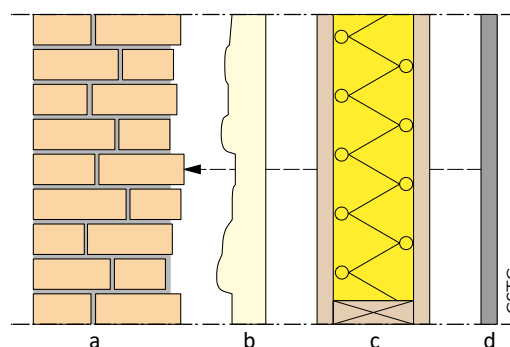


Fig. 34 Composition courante d'un système fermé.

- a. Mur existant
- b. Couche d'adaptation
- c. Cœur du module contenant l'isolation principale
- d. Couche extérieure/système de revêtement extérieur

Les sections suivantes décrivent les tâches liées à la conception des différentes couches, impliquant des choix en termes de matériaux et de mode d'assemblage. La composition choisie peut nécessiter des adaptations locales selon la position des modules dans le bâtiment. Toutes les tâches de conception doivent être considérées selon une approche intégrée, en tenant compte du comportement structurel, hygrothermique et acoustique du module, et des conséquences que cela entraîne en matière de confort et de sécurité.

4.4.1 COUCHE PRINCIPALE

QUESTIONS CLÉS

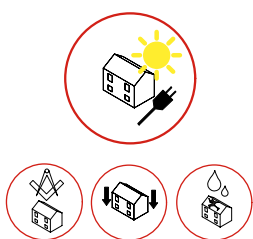
- Quels critères appliquer pour choisir le bois de structure, les caractéristiques d'isolation et le type de panneaux de revêtement ?
- Quelles sont les caractéristiques du bâtiment qui influencent ces choix ?
- Quels matériaux constituent un bon compromis entre le coût et la performance ?
- Comment les matériaux sont-ils assemblés ?

INFORMATIONS UTILES

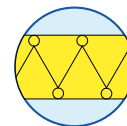
Provenant de la programmation

- Sur le plan légal : exigences minimales en matière de sécurité incendie, de performance énergétique et de confort intérieur
- Objectifs : performance environnementale visée, nouvelle valeur U visée pour l'enveloppe

Provenant de l'investigation



- Valeur U des murs existants
- Comportement hygrothermique des murs existants
- Teneur en humidité des murs existants
- Existence d'un débord de toiture
- Classe de hauteur du bâtiment selon l'AR sur la sécurité incendie
- Épaisseur admissible du nouveau mur (selon le code de l'urbanisme, p. ex.)
- Capacité portante des fondations et de la structure existantes



La couche principale est le cœur du module situé entre la couche d'adaptation et la couche de finition (voir figure 34-c, p. 52). Elle contient généralement les éléments structuraux et la ou les couches d'isolation principales. Il est possible d'y intégrer certaines technologies ainsi que des couches fonctionnelles (pare-vapeur, par exemple).

Du matériau industriel hautement performant au matériau biosourcé à faible impact carbone, il existe une large gamme de produits d'isolation pour les murs. Les aspects à considérer en vue de la conception de la couche d'isolation principale sont :

- la réaction au feu du matériau (à définir selon la norme NBN EN 13501-1) [18]
- sa valeur lambda
- l'épaisseur requise pour atteindre la valeur U visée, compte tenu des propriétés thermiques et de la géométrie des éléments structuraux (voir l'Annexe A de la norme NBN B 62-002) [2]
- la densité du matériau d'isolation et le poids propre qui en résulte pour le module de façade
- pour les matériaux en vrac, le risque de compression
- la réaction à l'eau (perméabilité à la vapeur, isotherme d'adsorption, succion d'eau) et l'impact potentiel de l'eau sur les caractéristiques physiques du matériau
- les indicateurs environnementaux (sur la base d'une analyse du cycle de vie, par exemple).

Exemples de matériaux isolants

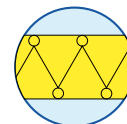
- Produits solides (panneaux ou nattes)
 - Laine minérale (MW)
 - Polystyrène expansé (EPS)
 - Polystyrène extrudé (XPS)
 - Polyuréthane rigide ou mousse de polyisocyanurate (PUR/PIR)
 - Mousse phénolique (PF)
 - Verre cellulaire (CG)
 - Laine de bois (WW)
 - Perlite expansée (EPB)
 - Fibre de bois (WF)
 - Aérogels et panneaux isolants sous vide (VIP)
- Produits en vrac
 - Laine minérale
 - Cellulose
 - Aérogels

Ces divers aspects doivent être examinés à la lumière de paramètres contextuels, tels que les restrictions urbanistiques imposées à l'épaisseur des murs. Dans le cas de la rénovation d'un mur creux au moyen d'un système AIM-ES, il convient d'étudier la possibilité d'isoler la coulisse, ce qui permettra, le cas échéant, de réduire l'épaisseur d'isolation (voir à ce sujet la [NIT 246](#)) [41]. Il n'est cependant pas toujours économiquement ou techniquement viable de sauver le parement de briques existant. S'il doit être démoli, il y a lieu d'examiner au préalable l'état de la coulisse, afin de pouvoir évaluer quelle couche d'adaptation sera nécessaire.

Le choix du matériau isolant est intrinsèquement lié aux éléments structuraux prévus à l'intérieur des modules AIM-ES. Dans un système à base de bois, la couche d'isolation principale se situe entre les montants structuraux, qui peuvent être en bois massif, en bois lamellé-croisé (CLT), se présenter sous forme de poutres en I, etc. La structure primaire est parfois renforcée par une structure perpendiculaire (figure 35) qui permet d'atteindre une plus forte épaisseur d'isolation sans trop accroître le poids de l'ossature ni entraîner de risques de ponts thermiques. Comme dans le cas d'un bâtiment neuf à ossature en bois, l'écart horizontal entre les montants dépend de la capacité portante attendue et de la taille standard des panneaux de contreventement.



Fig. 35 Structure en bois en couches croisées (Riihimäki) [56].



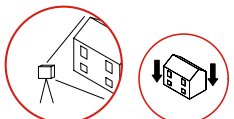
Un module TES ouvert nécessite un isolant en vrac, tandis qu'un module fermé peut également être isolé au moyen de panneaux. **Les matériaux en vrac exigent des précautions supplémentaires, étant donné les risques de compression et de tassement différentiels.** La cellulose est un isolant en vrac très prisé, mais sa sensibilité au feu et à l'humidité doit être examinée avec soin. Lorsque l'isolant est appliqué en usine, il y a lieu d'anticiper une altération possible du matériau pendant les phases de transport et de montage.

D'apparition récente sur le marché, les **aérogels** se caractérisent par des propriétés isolantes extrêmement élevées et une porosité totale d'environ 97 à 99 %, soit la densité connue la plus faible pour un matériau solide. La taille typique de leurs pores (environ 20 nm) est inférieure au parcours libre moyen des molécules d'air, ce qui explique leur conductivité thermique particulièrement faible. Ces matériaux parfois appelés 'fumée gelée' peuvent être produits à partir d'une variété de substances, bien que la silice et le verre soluble soient les constituants les plus courants. Les aérogels sont disponibles sous forme de rouleaux ou de particules en vrac utilisables en construction, par exemple pour la postisolation des murs creux. Dans le cas des systèmes AIM-ES, **l'usage de ces produits hautement performants pourrait être envisagé à l'avenir pour la couche d'isolation principale de modules de façade d'une forme innovante** (panneaux composites, par exemple). À l'heure actuelle, dans le cas de modules de type TES, ils peuvent être utilisés ponctuellement pour compenser un défaut local de la couche d'isolation thermique, par exemple devant un volet roulant ou au droit de technologies intégrées.

En ce qui concerne les couches centrales fixées à une ossature, il y a lieu de respecter plusieurs exigences au moment de concevoir le scellement avant et arrière (panneaux de revêtement en général). La première question à se poser est celle de la pertinence du panneau intérieur (faisant face au mur existant) et renvoie au choix entre configuration ouverte ou fermée. Rappelons que si l'on prévoit de préremplir les modules en usine, il convient d'appliquer une couche de confinement à l'arrière du module. En plus de son rôle structurel et de confinement, le panneau intervient dans le comportement physique du module AIM-ES à base de bois et donc dans sa performance finale. Une conception soignée garantit la sécurité et le confort des occupants.

Le tableau 8 (p. 55) présente les paramètres à considérer pour la conception de la couche centrale. Le tableau 9 (p. 55) résume, quant à lui, les points importants à prendre en compte au moment de choisir les panneaux et toute barrière technique supplémentaire.

4.4.2 COUCHE D'ADAPTATION

QUESTION CLÉ	
<ul style="list-style-type: none">• Comment remplir l'espace vide entre le mur existant et les nouveaux modules ?	
INFORMATIONS UTILES	
Provenant de la programmation	
<ul style="list-style-type: none">• Sur le plan légal : exigences de sécurité incendie• Objectifs : performance environnementale visée, durée prévue des opérations sur chantier• Climat : actions du vent	
Provenant de l'investigation	
	<ul style="list-style-type: none">• Irrégularités géométriques de la façade existante• Classe de hauteur du bâtiment selon l'AR sur la sécurité incendie• État et capacité portante des dalles de plancher• Accessibilité des dalles de plancher depuis l'extérieur

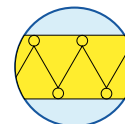
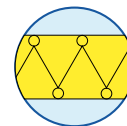


Tableau 8 Paramètres à prendre en compte pour la conception de la couche centrale.

<p>1. Propriétés et performance des matériaux</p> <ul style="list-style-type: none"> • LCA et coût ⁽¹⁾ • Densité • Valeur lambda ⁽¹⁾ • Réaction à l'humidité et risques de moisissures • Réaction au feu (NBN EN 13501-1) [18]
<p>2. Détails d'assemblage</p> <ul style="list-style-type: none"> • Systèmes de fixation • Couches techniques (feuilles, bandes, joints) • Ajustements locaux • Impact des points susmentionnés sur la performance de l'assemblage final <ul style="list-style-type: none"> – Poids des modules avant le transport – Poids final des modules et charges résultantes sur la structure existante – Capacité autoportante et portante des modules – Résistance au feu – Valeur U – Performance acoustique – Comportement hygrothermique et teneur en humidité relative attendue des matériaux ⁽²⁾ – Risques de ponts thermiques ⁽²⁾
<p>3. Réalisation</p> <ul style="list-style-type: none"> • Phase hors chantier <ul style="list-style-type: none"> – Modalités d'assemblage en usine et équipement requis – Poids des modules avant transport et montage • Phase de chantier : planification de l'application de la couche extérieure de revêtement et protection contre les intempéries ⁽³⁾
<p>⁽¹⁾ Les matériaux isolants à faible conductivité thermique ne sont pas nécessairement ceux dont l'impact sur le coût du cycle de vie sera le plus faible. Cependant, à performance égale, le mur obtenu sera moins épais.</p> <p>⁽²⁾ Si les nouveaux modules de façade sont appliqués sur les murs existants, il y a lieu d'envisager des simulations BEHAM (<i>Building Element, Heat, Air and Moisture</i>) au moyen d'outils spécialisés [65].</p> <p>⁽³⁾ Pendant les opérations sur chantier, il convient de prendre des mesures de protection adéquates pour les matériaux très sensibles à l'humidité. C'est particulièrement le cas lorsque la couche de protection contre les intempéries est appliquée après la fixation du module.</p>

Tableau 9 Points de vigilance spécifiques pour la conception des panneaux ou des modules de façade TES.

Système	Panneau extérieur	Isolation/structure	Panneau intérieur
TES fermé (sur mur existant)			
Résistance et réaction au feu	x	(x) ⁽¹⁾	(x) ⁽¹⁾
Pare-vapeur	–	–	(x)
Protection contre le vent	x ⁽²⁾	–	–
Protection contre la pluie	(x) ⁽³⁾	–	–
Protection acoustique	x	(x)	(x)
TES ouvert (sur mur existant)			
Résistance et réaction au feu	x	(x) ⁽¹⁾	
Pare-vapeur ⁽³⁾	–	–	
Protection contre le vent	x ⁽²⁾	–	
Protection contre la pluie	(x) ⁽³⁾	–	
Protection acoustique	x	(x)	
Légende : x = obligatoire, (x) = à vérifier, – = sans objet			
<p>⁽¹⁾ Tous les éléments composant le module jouent un rôle dans sa résistance au feu et sa réaction au feu. La couche d'isolation et le panneau intérieur ne doivent pas nécessairement être ininflammables, mais il y a lieu de bien connaître leur comportement au feu afin de garantir la sécurité incendie.</p> <p>⁽²⁾ La protection contre le vent est cruciale pour éviter que de l'air extérieur froid ne parvienne jusqu'à la couche d'adaptation. Outre l'infiltration à travers le panneau extérieur, il faut tenir compte des joints entre les modules, qui doivent également être protégés du vent.</p> <p>⁽³⁾ Les panneaux extérieurs seront étanches à la pluie (pare-pluie) ou non selon le système de revêtement utilisé (voir § 4.4.3, p. 59).</p>			



La surface d'un mur existant présente toujours des irrégularités plus ou moins prononcées qui ont en principe été évaluées lors de l'étude géométrique. La face arrière d'un module fermé ou la structure d'un module ouvert sont, pour leur part, rigoureusement planes. **À la fin des opérations de montage, le contact entre la façade existante et les éléments de la nouvelle enveloppe doit être parfait.** Il est donc nécessaire de procéder à un 'remplissage' de l'espace vide entre les murs existants irréguliers et les surfaces planes qui composent les nouveaux modules de façade. Ce remplissage s'effectue au moyen d'une couche d'adaptation.

La couche d'adaptation doit être conçue avec soin, dans la mesure où toute lame d'air qui subsisterait entre le mur existant et un module préfabriqué risque d'entraîner des dégâts ou de réduire les performances prévues. Cette interface joue également un rôle majeur dans les opérations d'alignement des modules de façade. L'utilisation préalable d'une sous-structure fixée à la structure du bâtiment permettra de simplifier le processus d'égalisation pendant le montage des modules et offrira des points de fixation aisés. Les diverses variantes possibles de la couche d'adaptation sont présentées en détail ci-après.

4.4.2.1 Pour les systèmes AIM-ES fermés

La première option pour la couche d'adaptation d'un système fermé consiste à appliquer, sur l'ensemble de la face l'arrière de l'élément, une **couche compressible qui servira à aligner les modules de façade.** L'épaisseur requise de cette couche dépendra de l'irrégularité et de l'aplomb de la façade ainsi que des matériaux qui la composent. Les bases de données 3D constituées en phase d'investigation peuvent s'avérer particulièrement précieuses à cet égard (cf. § 3.2.2, p. 20). Cette technique peu fréquente a été utilisée à Oulu avec des modules TES horizontaux (figure 36).



Jaakko Kallio-Koski;
arch. m3 Architects

Fig. 36 Couche de compression pour un système TES fermé à Oulu [92].

Une autre solution consiste à fixer, sur les murs existants, une sous-structure d'égalisation qui servira de support pour fixer les modules. Il existe deux possibilités de remplissage des vides entre les lattes d'égalisation : soit une couche de compression, généralement en laine minérale, soit un isolant en vrac insufflé après le montage des modules. Dans ce dernier cas, le manuel TES [65] préconise un vide d'une profondeur d'au moins 30 mm. Un autre paramètre de conception est l'orientation des lattes d'égalisation (figure 37).

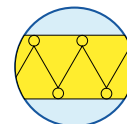


Arch. Kimmo Lylykangas



Architekturbüro Hohensinn

Fig. 37 À gauche : sous-structure d'égalisation horizontale pour modules verticaux à Riihimäki [56]. À droite : sous-structure d'égalisation verticale pour modules horizontaux à Graz [61].



Il existe nombre d'autres solutions pour concevoir la couche d'adaptation ou d'égalisation d'un module TES fermé. La figure 38 illustre quelques options possibles pour des systèmes AIM-ES à base de bois; les opérations de montage y sont présentées dans l'ordre chronologique.

Le tableau 10 (p. 58) résume les paramètres à considérer pour la conception de la couche d'adaptation des systèmes fermés. Quant au tableau 11 (p. 58), il présente les avantages et inconvénients des sous-structures d'égalisation.

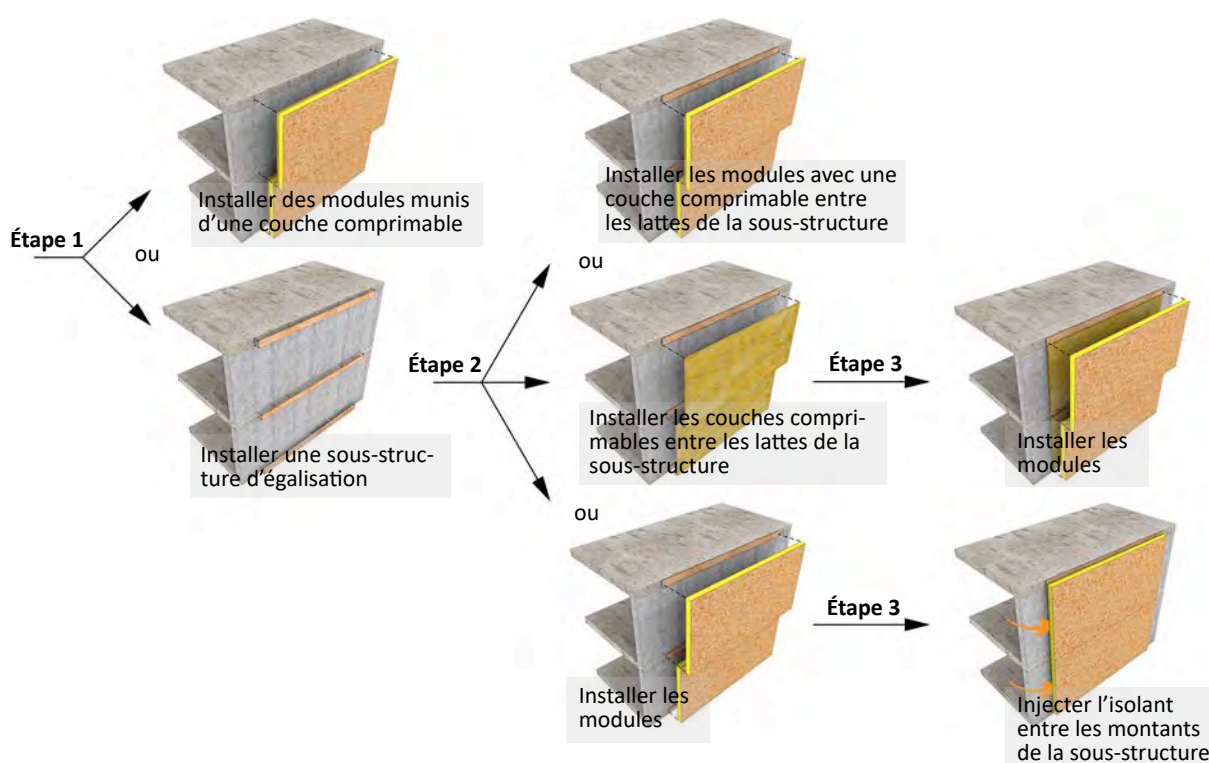


Fig. 38 Options envisageables pour la couche d'adaptation des systèmes TES à structure fermée et à orientation horizontale. Seule la configuration horizontale de la sous-structure est illustrée ici (source : CSTC).

4.4.2.2 Pour les systèmes AIM-ES ouverts

Dans un système ouvert, l'isolant principal (flocons ou particules) est injecté entre les montants de structure après le montage des modules, ce qui garantit l'absence d'air entre le mur existant et l'élément AIM-ES (figure 39). Cette technique nécessite un scellement adéquat au droit des bords des modules, afin de préserver le confinement de l'isolant insufflé et d'assurer une bonne étanchéité à l'air (figure 40, p. 59). Pour ce faire, on peut appliquer une bande de compression étanche à l'air sur la face arrière des éléments en bois du module (méthode utilisée dans le projet de Berlin) ou de la mousse combinée à du ruban adhésif (Pettenbach). Un avantage du système ouvert par rapport à la couche d'adaptation comprimée des systèmes fermés tient au fait que l'épaisseur fournie pour compenser l'irrégularité de la façade contribue à l'isolation du mur.



Fig. 39 Prototype illustrant la couche d'adaptation insufflée (Pettenbach) [62].

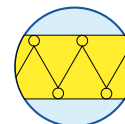
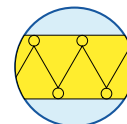


Tableau 10 Paramètres à prendre en compte pour la conception de la couche d'adaptation d'un système fermé.

OPTION 1 – COUCHE DE COMPRESSION SUR TOUTE LA FACE ARRIÈRE DU MODULE
<p>1. Propriétés et performance des matériaux</p> <ul style="list-style-type: none"> • LCA et coût des matériaux • Valeur lambda des matériaux et impact de la compression sur la valeur lambda • Réaction au feu (NBN EN 13501-1) [18]
<p>2. Détails d'assemblage</p> <ul style="list-style-type: none"> • Systèmes de fixation et détails de construction • Impact des points susmentionnés sur la performance de l'assemblage final <ul style="list-style-type: none"> – Résistance au feu – Étanchéité à l'air
<p>3. Réalisation</p> <ul style="list-style-type: none"> • Phase hors chantier <ul style="list-style-type: none"> – Modalités d'assemblage et équipement requis en usine (si la couche de compression est fixée aux modules hors chantier) – Poids des modules avant transport et montage (si la couche de compression est fixée aux modules hors chantier) • Phase de chantier <ul style="list-style-type: none"> – Risques de dégâts pendant le transport et/ou le montage – Équipement requis pour la fixation de la couche de compression (si elle est fixée aux murs existants ou aux modules sur chantier)
OPTION 2 – SOUS-STRUCTURE + ISOLATION INTERMÉDIAIRE
<p>1. Propriétés et performance des matériaux</p> <ul style="list-style-type: none"> • LCA et coût des matériaux • Valeur lambda du matériau intermédiaire <ul style="list-style-type: none"> – Impact de la compression sur la valeur lambda (si l'isolation intermédiaire est une couche de compression) – Impact d'une éventuelle compression sur la valeur lambda (si l'isolation intermédiaire est insufflée) • Réaction au feu de l'isolation intermédiaire (NBN EN 13501-1) [18] • Résistance aux efforts structuraux des éléments de la sous-structure
<p>2. Détails d'assemblage</p> <ul style="list-style-type: none"> • Systèmes de fixation et détails de construction (points d'ancrage de la sous-structure, par exemple) • Couches techniques requises (feuilles, bandes, joints) • Impact des points susmentionnés sur la performance de l'assemblage final <ul style="list-style-type: none"> – Résistance au feu – Sécurité incendie – Performance acoustique – Risques de ponts thermiques
<p>3. Réalisation – Phase de chantier</p> <ul style="list-style-type: none"> • Équipement requis pour le montage • Phasage du montage

Tableau 11 Avantages et inconvénients d'une sous-structure d'égalisation.

<p>1. La mise en place d'une sous-structure permet de disposer d'un support plan pour la fixation des modules.</p> <ul style="list-style-type: none"> • La phase de montage des modules est plus rapide, mais ... • ... les opérations nécessaires avant le montage sont plus nombreuses. • Les risques d'être confronté à un problème d'alignement ou d'ancrage pendant le montage sont moindres.
<p>2. La sous-structure et l'isolation entre les lattes requièrent une protection contre les intempéries, alors que la couche de compression sur la face arrière du module peut être protégée dès l'usine.</p>
<p>3. Le système de sous-structure peut être combiné à une injection d'isolant.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cela nécessite de prévoir une étanchéité latérale adéquate et ... • ... de forer des trous d'injection aisément accessibles (ce qui n'est pas toujours facile à réaliser). • Certains matériaux isolants en vrac sont particulièrement sensibles à l'humidité; de plus, une fois le produit injecté, les possibilités de séchage sont restreintes.



Les paramètres à considérer pour la conception de la couche d'adaptation des systèmes fermés sont synthétisés au tableau 12 (p. 60).

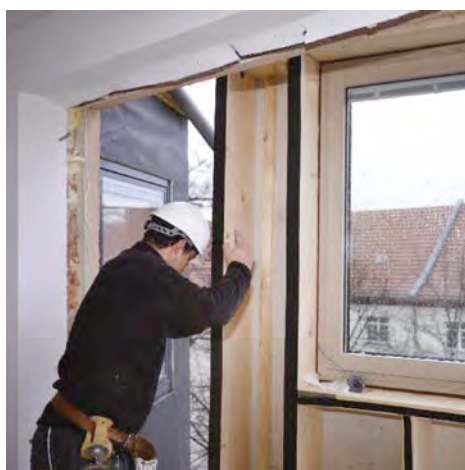


Fig. 40 Trous destinés à l'injection d'isolant en vrac après l'assemblage sur chantier.

Pose d'une bande de compression à l'arrière du module



Pose du module



Injection d'isolant depuis l'intérieur



Fig. 41 Placement d'un module TES ouvert à Berlin [80].

4.4.3 REVÊTEMENT EXTÉRIEUR DU MODULE DE FAÇADE

QUESTIONS CLÉS

- Quel est le rôle de la couche extérieure ?
- L'étanchéité à l'eau est-elle garantie tout au long du cycle de vie du bâtiment ?
- Prévoit-on d'intégrer des panneaux solaires dans la nouvelle façade ?
- Quelle est la méthode de mise en œuvre la plus adéquate (en usine ou sur chantier) compte tenu des aspects de conception et d'organisation ?

INFORMATIONS UTILES

Provenant de la programmation

- Objectifs : performance énergétique et environnementale prévue, aspect esthétique recherché
- Climat : actions du vent, pluies battantes, exposition au soleil

Provenant de l'investigation



- Alentours du bâtiment : ombre, éléments réduisant l'exposition à la pluie, etc.
- Limitations imposées par le code de l'urbanisme
- Classe de hauteur du bâtiment selon l'AR sur la sécurité incendie

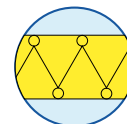


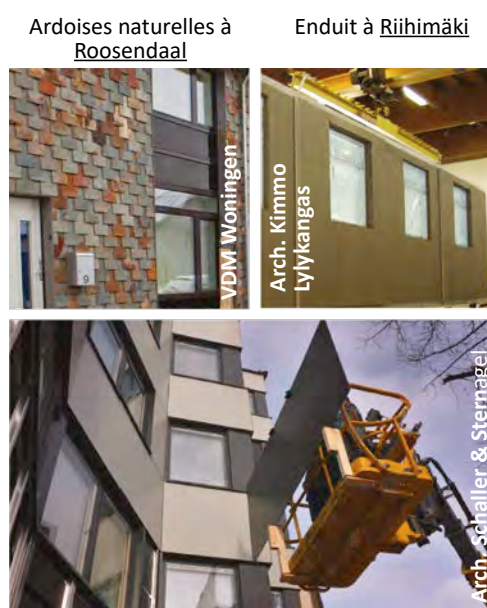
Tableau 12 Paramètres à prendre en compte pour la conception de la couche d'adaptation d'un système ouvert.

<p>1. Propriétés et performance des matériaux</p> <ul style="list-style-type: none">• LCA et coût des matériaux• Valeur lambda des isolants insufflés et impact d'une éventuelle compression sur la valeur lambda• Réaction au feu (NBN EN 13501-1) [18]
<p>2. Détails d'assemblage</p> <ul style="list-style-type: none">• Systèmes de fixation et détails de construction• Conception du scellement latéral<ul style="list-style-type: none">– Compression maximale du matériau d'étanchéité (selon les irrégularités géométriques maximales de la façade)– Risques de propagation du feu par le scellement latéral– Risques de convection de l'air par le scellement latéral– Durée de vie du système d'étanchéité– Modalités d'application de l'étanchéité• Conception des trous d'injection<ul style="list-style-type: none">– Impact sur le niveau de préfabrication– Accessibilité pour l'injection (→ appliquer une autre méthode localement, si nécessaire)• Impact des points susmentionnés sur la performance de l'assemblage final<ul style="list-style-type: none">– Performance thermique– Résistance au feu
<p>3. Réalisation – Phase de chantier</p> <ul style="list-style-type: none">• Modalités d'injection• Mesures de protection des modules avant l'injection et avant l'application de la couche extérieure (revêtement extérieur, par exemple)

Les matériaux composant la couche extérieure des modules de façade AIM-ES doivent être choisis sur la base de critères performantiels, mais aussi architecturaux et esthétiques. Des exigences spécifiques doivent en outre être définies en matière de **protection contre les intempéries et le vandalisme**. Il existe une large gamme de matériaux pour recouvrir les modules de façade entièrement (ou partiellement en présence de technologies solaires) : revêtements en bois massif, panneaux de particules de bois, pierre naturelle, briquettes, feuilles de cuivre, de zinc, d'acier, etc. (figure 42). Le tableau 13 (p. 61), inspiré du manuel TES [65] et adapté à la situation belge, donne un aperçu des nombreux choix possibles. Les modalités de pose du revêtement doivent également être définies selon le produit retenu et son assemblage type (figure 43, p. 61).

Pour atteindre les normes de performance énergétique les plus élevées, il est généralement nécessaire de prévoir une forte épaisseur d'isolation thermique. À cet égard, les murs très épais posent souvent problème notamment en termes d'espace et d'éclairage, en particulier dans le cas d'une rénovation. Des **panneaux solaires passifs innovants** pourraient remplacer une partie de l'isolation thermique requise. Ces panneaux sont constitués d'un vitrage recouvrant un vide d'air ventilé et une structure en cellulose ou en bois. Cette structure, qui peut être alvéolaire (fig. 44, p. 62) ou lamellaire (fig. 45, p. 62), capte la lumière du soleil pour créer une zone tampon d'une température supérieure à celle de l'air extérieur. Le gradient de température à travers le mur étant considérablement réduit, ses déperditions calorifiques par transmission diminuent. Ce système est parfois appelé **façade solaire** [75].

(suite du texte en page 62)



Panneaux stratifiés HPL à Berlin [80]
Fig. 42 Revêtements divers pour la couche extérieure.

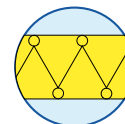


Tableau 13 Matériaux de revêtement utilisables pour la couche extérieure des modules AIM-ES (adapté du Manuel TES) [65].

SYSTÈME DE REVÊTEMENT	COUCHES	NORMES ET RÉFÉRENCES UTILES
Briques ou briquettes	Couche adhésive, bandes minérales	NBN EN 771-1 [6], NBN EN 10545-12 [26], ETAG 017 [73]
Panneau en fibrociment	Lattage (ou autre système de fixation) et panneaux	NBN EN 12467 [11]
Revêtement en fibrociment	Lattage (ou autre système de fixation) et ardoises ou panneaux	NBN EN 492 [4]
Système de vitrage	Système de vitrage agréé	NBN S 23-002 [33], NIT 214 [37], NIT 221 [38]
Stratifié haute pression (HPL)	Lattage (ou autre système de fixation) et plaques ou panneaux	NBN EN 438-7 [3]
Tôle métallique	Système de tôles métalliques agréé	NBN EN 14782 [20], NBN EN 14783 [21]
Revêtement en ardoises naturelles	Lattage et ardoises	NIT 228 [39], STS 34:03.6 [83]
Système de façade synthétique	Système de façade synthétique agréé	NBN EN 13245-2 [16]
Enduit	Couche adhésive, enduit	NBN EN 13914-1 [19], NBN EN 13499 [17], NIT 209 [36]
Composants solaires actifs	Système de panneaux solaires agréé	CEI 61215 [45], NBN EN 12975 à 12977 [13, 14, 15]
Composants solaires passifs	Système de façade solaire passive agréé (isolation thermique translucide, par exemple)	–
Système composite d'isolation thermique	Système agréé d'isolation avec enduit ou autre revêtement minéral (briquettes, par exemple)	ETAG 004 [71], ETAG 014 [72], NIT 209 [36], NIT 257 [44]
Bardage en bois	Lattage (ou autre système de fixation) et bardeaux, lames, etc.	NBN EN 14915 [22], NIT 243 [40]
Panneau en bois	Lattage (ou autre système de fixation) et panneaux	NBN EN 634-1 [5], NIT 243 [40]

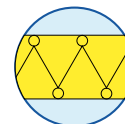
Panneaux de bois intégrés en usine (Londres)



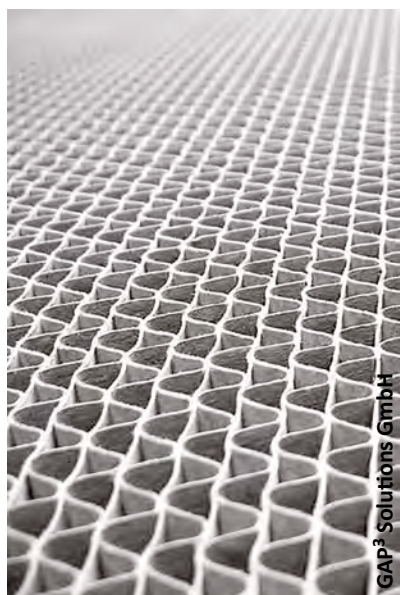
Lames en bois intégrées en usine et revêtement sur chantier (Oulu) [67]



Fig. 43 Pose du revêtement.



Gros plan sur la structure en carton



Panneau solaire innovant fixé sur un module TES fermé



Fig. 45 Panneau solaire passif à structure lamellaire [77].

Fig. 44 Panneaux solaires passifs à structure alvéolaire.

(suite de la page 60)

Le système fonctionne selon un cycle jour-nuit, l'énergie de la lumière solaire étant captée et stockée sous forme de chaleur pendant la journée et la réserve de chaleur circulant ensuite pendant la nuit. Le fonctionnement du système dépend également de la saison. En été, les rayons très obliques du soleil traversent difficilement la structure alvéolaire ou lamellaire. Le système absorbe dès lors peu d'énergie et le vide ventilé aide à prévenir la surchauffe. En hiver, les rayons du soleil presque horizontaux pénètrent dans la structure alvéolaire ou lamellaire, chauffant l'air dans les zones creuses et la masse du matériau sous-jacent. L'air frais dans le vide ventilé entraîne moins de convection qu'en été, créant une couche d'isolation supplémentaire.

Dans plusieurs projets européens clôturés, des panneaux solaires passifs ont été utilisés sur des systèmes de façade fermés à base de bois, afin d'atteindre un niveau de performance élevé [60]. En Belgique, ces systèmes ne sont couverts par aucune norme et nécessitent encore une validation. De plus, leurs performances ne peuvent pas être facilement évaluées sur la base de simulations numériques.

Tableau 14 Paramètres à prendre en compte pour la conception du revêtement extérieur.

<p>1. Propriétés et performance des matériaux</p> <ul style="list-style-type: none"> • LCA et coût des matériaux • Compatibilité des matériaux • Résistance à la corrosion et durée de vie • Résistance à la pollution • Réaction au feu
<p>2. Détails d'assemblage</p> <ul style="list-style-type: none"> • Système(s) de fixation • Besoin éventuel d'un pare-pluie • Besoin éventuel d'un système de support (sous-structure, couche préparatoire de l'enduit, etc.)
<p>3. Transport</p> <p>Risques de dégradation pendant le transport (si la couche de revêtement extérieure est appliquée en usine)</p>
<p>4. Occupation et utilisation du bâtiment</p> <p>Acceptation par les occupants et le voisinage de l'aspect de la façade rénovée</p>

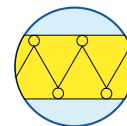
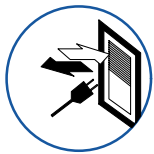


Tableau 15 Avantages et inconvénients de l'application de la couche extérieure en usine ou sur chantier.

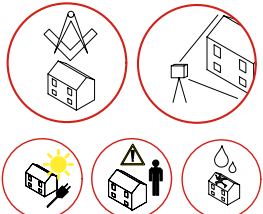
1. L'application en usine de la couche de revêtement nécessite de protéger cette dernière pendant le transport et le stockage ...
2. ... mais une application sur chantier peut également exiger des mesures de protection temporaire.
3. Certaines couches extérieures sont tout simplement incompatibles avec le transport.
4. Si les modules AIM-ES sont livrés avec leur revêtement extérieur, il peut être plus difficile de réaliser une jonction étanche entre les éléments.

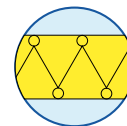
4.5 SYSTÈMES ET ÉQUIPEMENTS INTÉGRÉS AUX MODULES

	QUESTIONS CLÉS <ul style="list-style-type: none">• Quels systèmes et équipements est-il possible d'intégrer dans les modules de façade AIM-ES choisis (châssis, installations techniques, protection solaires, etc.) ?• Comment concevoir ces systèmes de façon appropriée, tout en garantissant la performance et la sécurité de la façade rénovée ?
-----------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

L'un des avantages intrinsèques de la solution AIM-ES réside dans la possibilité d'intégrer divers systèmes et équipements, directement en usine, totalement ou partiellement dans les modules de façade : châssis, dispositifs de ventilation, panneaux solaires, etc. Ces éléments peuvent être installés en divers points de l'enveloppe rénovée : à l'intérieur des modules, sur leur surface extérieure, le long de la couche d'adaptation, etc.

4.5.1 CHÂSSIS

QUESTIONS CLÉS	
<ul style="list-style-type: none">• Quelle est la performance souhaitée des fenêtres (étanchéité à l'air, transmission thermique, lumière naturelle) ?• Quelle est la performance des fenêtres actuelles ?• Ont-elles été remplacées récemment ?• Serait-il économiquement avantageux de les remplacer, même si leur durée de vie théorique n'est pas atteinte ?• Si de nouvelles fenêtres sont nécessaires, quelle devrait être leur position dans le plan de la façade ?	
INFORMATIONS UTILES	
Provenant de la programmation	
<ul style="list-style-type: none">• Sur le plan légal : exigences en termes de performance énergétique (valeur U), de renouvellement d'air et d'urbanisme• Climat : nombre d'heures d'exposition directe aux rayons du soleil• Objectifs : performance énergétique et environnementale attendue, type de ventilation prévu	
Provenant de l'investigation	
	<ul style="list-style-type: none">• Géométrie des baies existantes• Caractéristiques des fenêtres et appuis existants• Performance énergétique des châssis existants• Problème de surchauffe dans le bâtiment existant• Confort existant lié à l'éclairage naturel• Ombre portée par les alentours sur le bâtiment



4.5.1.1 Possibilités d'intégration

La préfabrication offre diverses possibilités d'intégrer des fenêtres neuves directement dans les modules de façade AIM-ES.

Si les châssis ont une faible efficacité énergétique ou présentent d'importantes dégradations, il convient de les remplacer dans leur intégralité. La solution la plus appropriée consiste à adapter la taille des réservations pratiquées dans les modules de façade aux baies existantes, dont les dimensions ont été mesurées lors de l'étude géométrique détaillée. On peut également envisager d'agrandir les baies pour améliorer l'éclairage naturel ou, au contraire, de les rétrécir pour limiter la surchauffe en été. De telles opérations s'accompagnent évidemment de nombreux travaux supplémentaires sur chantier et limitent les possibilités d'occupation des locaux.

Si les châssis ont déjà fait l'objet d'une rénovation antérieure, on peut se contenter d'installer des modules ne contenant pas de châssis. Dans ce cas, il est important de veiller à un **assemblage minutieux entre les anciennes fenêtres et les modules**. L'étanchéité à l'air et à l'eau peut en outre s'avérer plus difficile à atteindre.

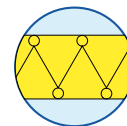
Une troisième option consiste à poser une nouvelle fenêtre parallèlement à la fenêtre existante (figure 46).



Fig. 46 Conservation de la fenêtre existante et intégration d'une fenêtre étanche à l'air munie de simple vitrage dans un module AIM-ES.

Lors de la conception, il convient d'accorder une attention particulière au **positionnement des fenêtres (neuves ou anciennes) par rapport au plan principal d'isolation**. Ce paramètre est particulièrement important pour prévenir les ponts thermiques et les nuisances acoustiques, mais aussi pour garantir l'étanchéité à l'air et la résistance au feu. Des simulations simplifiées permettent de démontrer que le positionnement des fenêtres a un impact sur les déperditions calorifiques [53] et sur le confort acoustique. Que les anciennes fenêtres soient conservées ou remplacées, des ponts thermiques sont toujours susceptibles de se former. Ce point est largement évoqué dans le document 'Advances in Housing Retrofit' [53].

L'éclairage naturel est également une facette importante de la conception des fenêtres. Pour de plus amples informations à ce sujet, on consultera le manuel TES [65].



4.5.1.2 Dispositifs complémentaires associés au châssis

Pour éviter les problèmes de surchauffe en été, des stores peuvent être intégrés directement aux châssis de fenêtre (figure 47) ou à l'intérieur du module AIM-ES, généralement derrière le revêtement. Dans ce dernier cas, des matériaux d'isolation hautement performants sont disposés localement pour prévenir les ponts thermiques.

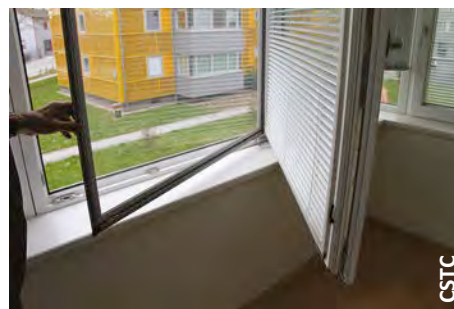


Fig. 47 Store intégré au châssis de fenêtre.

Les zones de jonction des fenêtres constituent des points de passage privilégiés pour les transferts d'air et de vapeur (cf. la Note d'information technique n° 255 du CSTC) [43]. L'usage de bandes de scellement correctement positionnées à la périphérie de la nouvelle fenêtre (côté intérieur) garantira l'étanchéité à l'air du bâtiment. La diffusion de vapeur depuis les locaux vers les modules ou leur couche d'adaptation peut entraîner, quant à elle, une condensation interne, en particulier dans les systèmes ouverts, dont l'isolant ne peut être rendu étanche à la vapeur en usine. Le risque de dommage est encore accru en présence de matériaux isolants très sensibles à l'humidité tels que la cellulose. Dans ce cas, des mesures de conception appropriées devraient assurer une évacuation vers l'extérieur de la vapeur qui aurait pénétré au cœur du module.

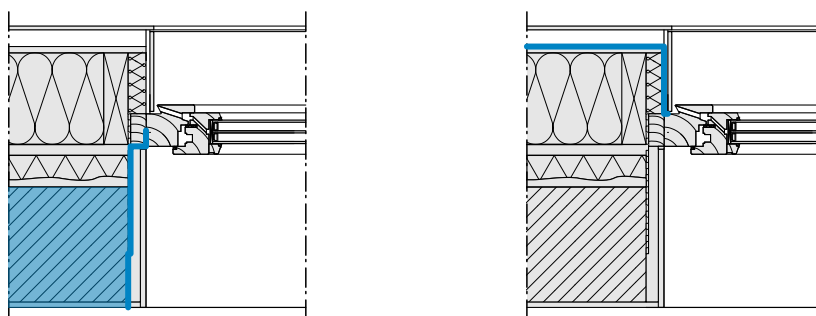
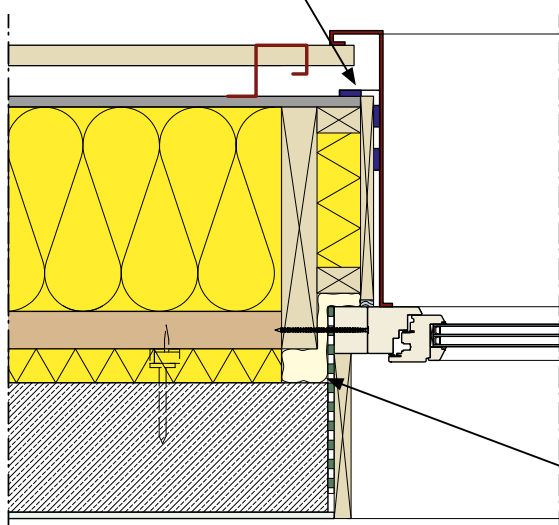


Fig. 48 Étanchéité à l'air (à gauche) et protection contre le vent (à droite) (adapté de Tijssens) [87].

Bande d'étanchéité au vent



Bande d'étanchéité à l'air



Fig. 49 Étanchéité à l'air et protection contre le vent à Pettenbach (adapté de Lang et al.) [62].

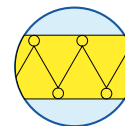


Tableau 16 Paramètres importants pour la conception des châssis et de leur équipement en cas de remplacement des fenêtres ou de pose de fenêtres rapportées.

<p>1. Propriétés et performance des matériaux</p> <ul style="list-style-type: none">• LCA et coût des matériaux• Performance des matériaux• Résistance à la corrosion et durée de vie des matériaux
<p>2. Détails d'assemblage</p> <ul style="list-style-type: none">• Construction du châssis• Performance du vitrage• Poids des fenêtres et impact sur le poids des modules• Emplacement des couches d'étanchéité à l'air et à la vapeur• Système de ventilation (passif ou actif) éventuellement intégré• Impact des points susmentionnés sur la performance de l'assemblage final<ul style="list-style-type: none">– Valeur U de la fenêtre dans son ensemble– Risques de ponts thermiques ou de problèmes hygrothermiques– Confort thermique à l'intérieur des locaux– Confort visuel et thermique des occupants
<p>3. Réalisation</p> <ul style="list-style-type: none">• Phase hors chantier<ul style="list-style-type: none">– Mise en place des barrières d'étanchéité à l'air– Protection des éléments de fenêtre pendant le transport– Garantie de qualité• Phase de chantier<ul style="list-style-type: none">– Enlèvement éventuel des fenêtres existantes (par l'intérieur ou l'extérieur)– Enlèvement ou adaptation des appuis de fenêtre (éventuellement)– Élargissement éventuel des baies– Protection des éléments de fenêtre pendant le transport– Assemblage correct des barrières d'étanchéité à l'air avec la structure existante
<p>4. Occupation et utilisation du bâtiment</p> <ul style="list-style-type: none">• Prise en compte des nuisances éventuelles pour les occupants dans le processus décisionnel (enlèvement des fenêtres de l'intérieur, par exemple)• Information et sensibilisation des occupants quant à l'utilisation des dispositifs associés aux châssis

4.5.2 ÉQUIPEMENTS TECHNIQUES

QUESTIONS CLÉS

- Quels systèmes et quels conduits peut-on intégrer dans les modules ?
- Comment garantir la performance de la nouvelle enveloppe, une fois ces systèmes installés ?

Les divers équipements techniques susceptibles d'être intégrés aux modules AIM-ES comprennent à la fois des dispositifs générateurs (producteur de chaleur, ventilateur, etc.) et des éléments de raccord (conduits ou câbles). Le troisième rapport du projet smartTES [75] distingue trois niveaux d'intégration des systèmes dans des modules TES, qui peuvent être extrapolés à tous les modules AIM-ES (figure 50, p. 67) :

- la **configuration intégrée** concerne les petits appareils de ventilation ou de production d'énergie placés dans des modules de façade simples. Le raccordement de l'appareil au bâtiment est court et le système est placé à proximité du lieu de consommation
- la **configuration connectée** concerne des conduits traversant plusieurs modules et raccordés à une installation technique de grande dimension relativement distante du lieu de consommation (groupe de ventilation mécanique, par exemple)
- le **concept d'enveloppe** réunit une variété de systèmes innovants comme les façades solaires évoquées précédemment (voir § 4.4.3, p. 59). Une grande partie de la surface du module fait fonction d'élément technique.

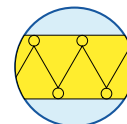


Fig. 50 Les trois niveaux d'intégration des systèmes selon le projet smartTES (adapté de Lattké) [75].

Le niveau d'intégration des équipements peut être très poussé, combinant des systèmes de ventilation, de chauffage, de refroidissement, d'alimentation en eau, d'évacuation des eaux usées, de production photovoltaïque, de chauffage solaire et d'autres équipements tels que réseau LAN ou lignes électriques. La conception de ces systèmes implique un travail supplémentaire significatif, dans la mesure où leur intégration doit être considérée à l'échelle du bâtiment dans son ensemble, car ses implications sont nombreuses : la performance d'isolation thermique et acoustique du module doit être garantie, de même que sa sécurité incendie et son étanchéité à l'air. Cependant, ce travail permet de libérer du volume intérieur qui, sans cela, serait occupé par des installations traditionnelles.

Les câbles, conduits et gaines nécessaires peuvent être installés en divers points de la façade. Il est ainsi possible de les fixer sur la façade existante et de les recouvrir avec les modules. La couche d'adaptation offre en effet suffisamment d'espace pour 'recouvrir' des éléments de faible ou moyen diamètre : câble téléphonique, câble Ethernet, petits conduits, etc. (figure 51). Les éléments de plus grand diamètre, tels les conduits de ventilation, peuvent être directement incorporés aux modules lors de l'assemblage en usine. Pour les câbles, qui ne sont pas sensibles aux basses températures, l'espace situé derrière le revêtement peut également être mis

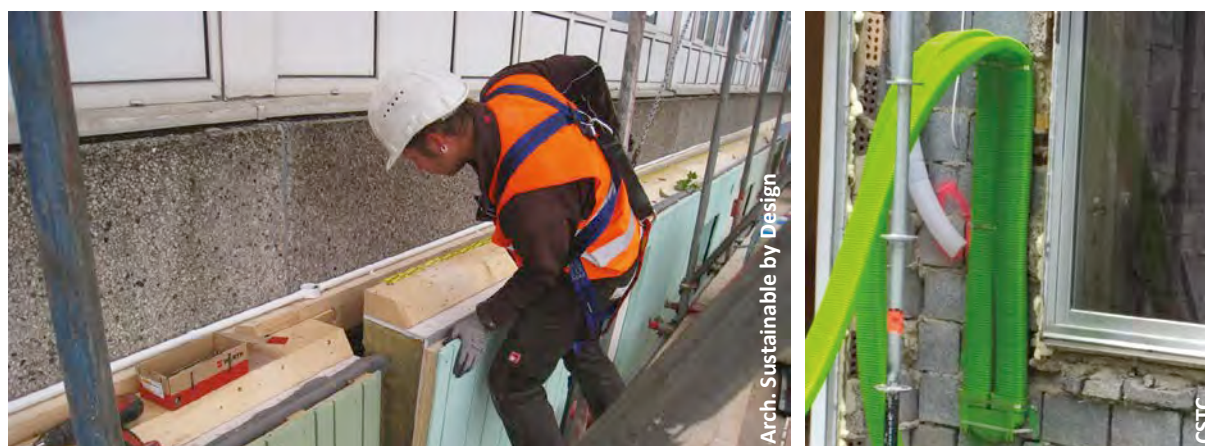
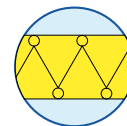
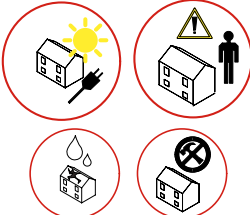


Fig. 51 À gauche : tuyaux de petit diamètre intégrés à la couche d'adaptation du module AIM-ES à Londres. À droite : gaines de ventilation intégrées à la couche d'adaptation (projet de rénovation expérimentale Ecoren).



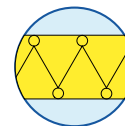
à profit. Dans tous les cas de figure, l'intégration de conduits et de câbles au sein du module de façade doit être réalisée en respectant les prescriptions en matière de sécurité incendie et en analysant l'impact de cette intégration sur la performance hygrothermique.

4.5.2.1 Systèmes de ventilation

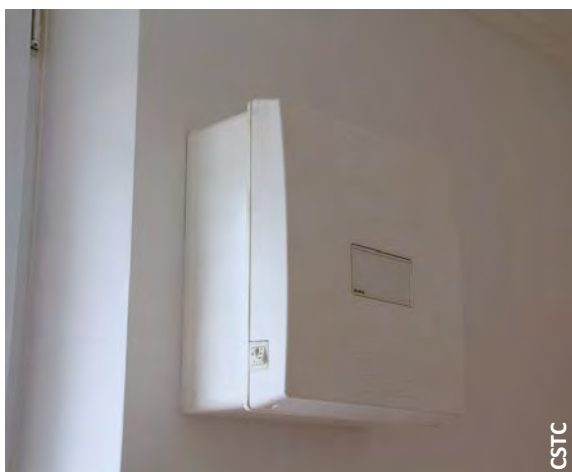
QUESTIONS CLÉS	
<ul style="list-style-type: none">• Quels systèmes devraient être rénovés ou mis en place ?• Quel est le meilleur choix : ventilation décentralisée, rénovation ou adaptation du système centralisé existant, nouveau système centralisé ?• Quid de l'entretien ?• Les entrées et les sorties d'air peuvent-elles être intégrées au module, de manière discrète si nécessaire ?	
INFORMATIONS UTILES	
Provenant de la programmation	
<ul style="list-style-type: none">• Sur le plan légal : exigences en termes de performance énergétique (niveau E), de renouvellement d'air, de sécurité incendie et d'urbanisme• Climat : substances polluantes présentes dans l'air ambiant• Objectifs : performance énergétique et environnementale prévue, qualité de l'air intérieur attendue (teneurs admises pour les divers polluants)	
Provenant de l'investigation	
	<ul style="list-style-type: none">• Performance énergétique de l'ensemble du bâtiment existant• Problèmes d'humidité ou de moisissure existants• Profil d'occupation• Qualité de l'air intérieur (niveaux de CO₂ mesurés, par exemple)• État du ou des systèmes de ventilation existants et potentiel d'optimisation• Conduit d'évacuation d'air existant• Hauteur de plafond des locaux

Les bâtiments pour lesquels on envisage une rénovation approfondie de l'enveloppe sont souvent équipés d'installations techniques vétustes et, lorsqu'ils existent, de systèmes de ventilation mal conçus. Un niveau de performance énergétique élevé est toujours associé à des objectifs d'étanchéité à l'air. La conception des systèmes de ventilation constitue dès lors un corollaire essentiel de la rénovation de l'enveloppe, si l'on veut garantir un environnement hygiénique pour les occupants et éviter l'apparition de problèmes d'humidité. **Grâce aux configurations 'intégrées' et 'connectées' aux systèmes AIM-ES, il est possible de repenser la stratégie de ventilation et de mettre en œuvre des systèmes modernes de type D, centralisés ou décentralisés.**

Une première possibilité de rénovation innovante consiste à installer des **groupes de ventilation décentralisés**. Les petites centrales de traitement d'air (AHU – *Air Handling Unit*) avec récupération de chaleur (figure 52, p. 69) peuvent être mises en place au moyen de conduits horizontaux courts qui traversent la façade AIM-ES. Certains systèmes fonctionnent avec des conduits distincts pour l'arrivée d'air et pour l'évacuation, généralement placés côte à côte à l'intérieur du module. D'autres systèmes fonctionnent avec un conduit alternant aspiration et extraction de l'air. Dans un petit appartement, on peut se contenter d'une seule centrale de traitement, contrairement aux appartements plus grands qui peuvent nécessiter plusieurs unités.



Groupe de ventilation installé sur un mur intérieur



Principe de fonctionnement

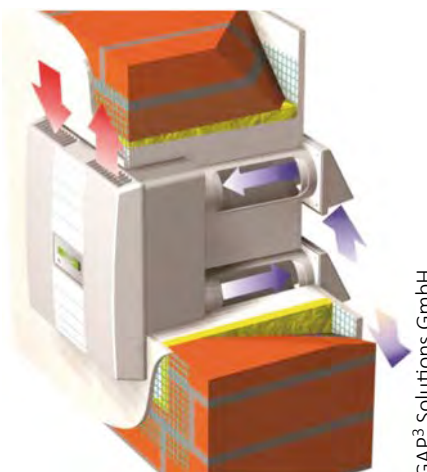


Fig. 52 Technologie de ventilation décentralisée utilisée à Graz.

Ces approches offrent l'avantage de ne pas nécessiter de raccordement complexe entre les modules et de limiter les interventions à l'intérieur du bâtiment. Le contrôle de la ventilation peut être simplifié en associant le groupe de ventilation à divers capteurs (pour l'humidité, le CO₂, etc.), ce qui permet de mettre en place un système de ventilation 'à la demande'. Pour des raisons esthétiques, les entrées et les sorties d'air peuvent être dissimulées derrière le revêtement du module AIM-ES (figure 53). Du côté des inconvénients des unités décentralisées, on notera que les filtres à air doivent être remplacés depuis l'intérieur des locaux une à deux fois par an. Comme il est probable que ce remplacement soit effectué par les occupants, il convient de les informer correctement à ce sujet.

L'acoustique constitue un autre paramètre important, puisque les ventilateurs sont situés à l'intérieur des locaux. Les débits de renouvellement d'air imposés par la PEB peuvent être source d'inconfort acoustique, car il s'agit de valeurs de conception généralement proches du flux maximum pouvant être atteint par l'appareil. Cependant, une fois le système conçu, installé et correctement configuré, le débit de ventilation peut être réglé en fonction des besoins réels des occupants.

Une deuxième possibilité consiste à installer un nouveau système de ventilation centralisé qui assurera les échanges d'air avec l'extérieur et sera idéalement muni d'un récupérateur de chaleur. Ce groupe est raccordé aux différents locaux par des conduits intégrés aux modules de façade. À Riihimäki, des conduits verticaux d'arrivée d'air de 100 x 120 mm et de 100 x 150 mm ont été intégrés dans des modules TES verticaux pour limiter les raccordements (figure 54, p. 70). Le système de ventilation centralisé a été privilégié en raison de son entretien, qui ne nécessite pas l'intervention des occupants. À Zurich, par contre, l'orientation horizontale des modules TES a exigé un important travail de raccordement du réseau de conduits de la ventilation centralisée lors du montage des modules. Ce réseau était composé de conduits direc-



Fig. 53 Entrée et sortie d'air apparentes de groupes de ventilation décentralisés (en haut) ou dissimulées derrière un vitrage (en bas).

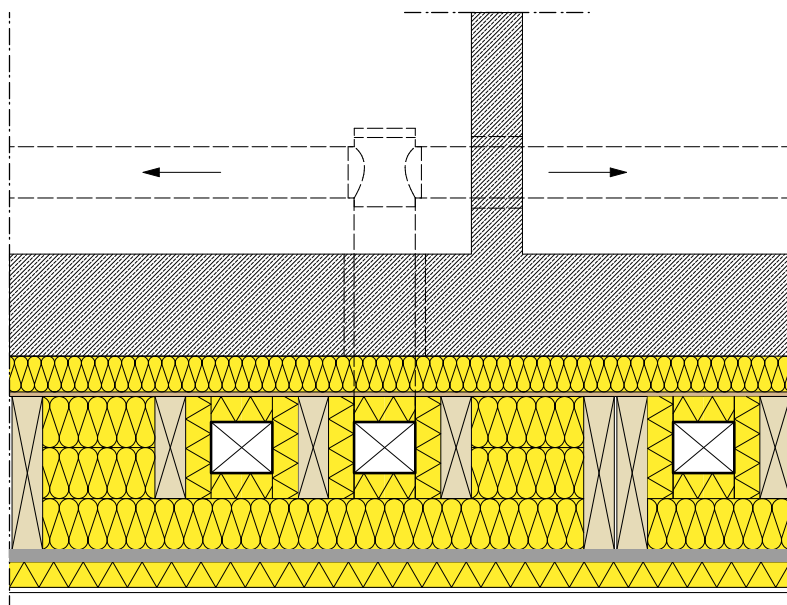
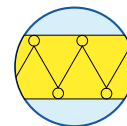


Fig. 54 Conduits de ventilation intégrés dans un module TES vertical à Riihimäki (adapté de Kimmo Lylykangas) [57].

tement intégrés aux modules en usine (figure 55). Une autre option, appliquée à Kapfenberg, consiste à placer les conduits dans des caissons distincts installés sur chantier indépendamment des modules TES (figure 56).

Le tableau 17 (p. 71) reprend les paramètres importants pour la conception d'un système de ventilation intégré ou connecté.

Conduits intégrés dans une gaine ignifuge spéciale à l'intérieur des modules AIM-ES



Vue de haut d'un module AIM-ES révélant les conduits de ventilation



Fig. 55 Conduits de ventilation intégrés dans des modules TES horizontaux à Zurich.



← Conduits intégrés dans un caisson installé entre les modules de façade

Détail de conception

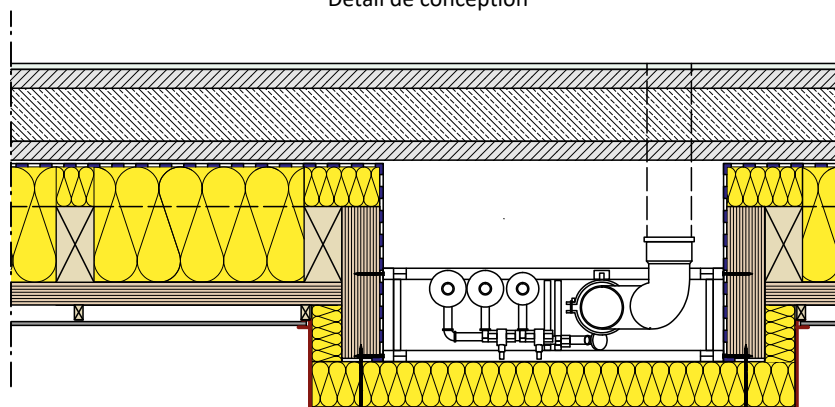


Fig. 56 Conduits de ventilation intégrés dans une gaine, à Kapfenberg (adapté de Nussmüller Architekten).

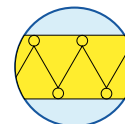
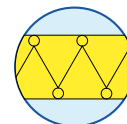


Tableau 17 Paramètres importants pour la conception d'un système de ventilation intégré ou connecté.

OPTION 1 – VENTILATION DÉCENTRALISÉE (INSTALLATION INTÉGRÉE)
1. Propriétés et performance des matériaux (conduits, mécanismes et couches techniques) <ul style="list-style-type: none">• LCA et coût des matériaux• Durabilité des barrières d'étanchéité à l'air
2. Détails d'assemblage <ul style="list-style-type: none">• Systèmes de fixation et détails de construction• Couches techniques (feuilles, bandes, joints) et dispositifs requis (clapet antifeu, par exemple)• Emplacement des groupes décentralisés et des entrées et sorties d'air• Caractère apparent des entrées et sorties d'air• Distance entre les entrées et sorties d'air• Impact des points susmentionnés sur la performance de l'assemblage final<ul style="list-style-type: none">– Confort acoustique– Risques de reflux d'air vicié (bouche d'extraction trop proche d'une bouche d'amenée d'air, par exemple)– Risques de ponts thermiques
3. Réalisation <ul style="list-style-type: none">• Phase hors chantier : modalités et équipement liés au prémontage des conduits en usine• Phase de chantier<ul style="list-style-type: none">– Risques de dégâts pendant le transport– Forage de trous dans la façade existante pour le montage des entrées et sorties d'air
4. Occupation et utilisation du bâtiment <p>Formation des occupants au sujet de l'utilisation et de la maintenance de l'équipement</p>
OPTION 2 – VENTILATION CENTRALISÉE (INSTALLATION CONNECTÉE)
1. Propriétés et performance des matériaux (conduits, mécanismes et couches techniques) <ul style="list-style-type: none">• LCA et coût des matériaux• Durabilité des barrières d'étanchéité à l'air
2. Détails d'assemblage <ul style="list-style-type: none">• Systèmes de fixation et détails de construction• Couches fonctionnelles (feuilles, bandes, joints) et mécanismes requis (pare-feu)• Détails de raccord entre les modules• Tracé clair des conduits et raccords• Impact des points susmentionnés sur la performance de l'assemblage final<ul style="list-style-type: none">– Risques de propagation du feu par les conduits (à évaluer avec attention)– Ponts thermiques
3. Réalisation <ul style="list-style-type: none">• Phase hors chantier : modalités et équipement liés au prémontage des conduits en usine• Phase de chantier<ul style="list-style-type: none">– Risques de dégâts pendant le transport– Mesures d'alignement des conduits
4. Occupation et utilisation du bâtiment <p>Formation des occupants au sujet de l'utilisation de l'équipement</p>



4.5.2.2 Panneaux solaires

QUESTIONS CLÉS

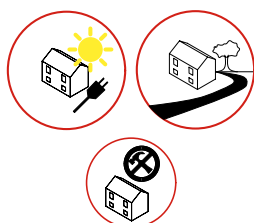
- L'utilisation de technologies solaires en façade est-elle justifiée ?
- Quels sont les avantages attendus ?
- Quelle(s) façade(s) présente(nt) une bonne exposition au soleil ?
- Dans quelles parties du bâtiment l'eau chaude sanitaire (ECS) doit-elle être distribuée ?

INFORMATIONS UTILES

Provenant de la programmation

- Sur le plan légal : exigences de performance énergétique (niveau E)
- Climat : ensoleillement
- Objectifs : performance énergétique prévue, performance environnementale prévue

Provenant de l'investigation



- Performance énergétique de l'ensemble du bâtiment (consommation d'eau chaude, électricité et chauffage)
- Distance entre les façades et les zones de consommation d'ECS
- Ombrage dû à l'environnement du bâtiment
- Limites imposées par le code urbanistique en ce qui concerne les transformations extérieures

La conception de modules AIM-ES offre de nombreuses possibilités d'intégration de technologies solaires (figure 57) pouvant compléter les systèmes installés en toiture ou dans d'autres parties du bâtiment (support orienté fixé au bâtiment ou installé sur la parcelle, par exemple). Des panneaux photovoltaïques (PV) ou des capteurs thermiques peuvent facilement être fixés sur la face extérieure d'un module de façade. Les exemples d'application sont légion en Europe. Une approche particulière consiste à faire usage de panneaux PV pour produire de l'eau chaude sanitaire (ECS). Le courant continu est directement utilisé pour chauffer l'eau dans un boiler. Outre le fait qu'elle ne nécessite pas de transformer le courant continu en courant alternatif, cette solution s'avère intéressante lorsque les capteurs thermiques ne conviennent pas en raison de la distance entre la façade et les locaux où l'on utilise l'eau chaude.

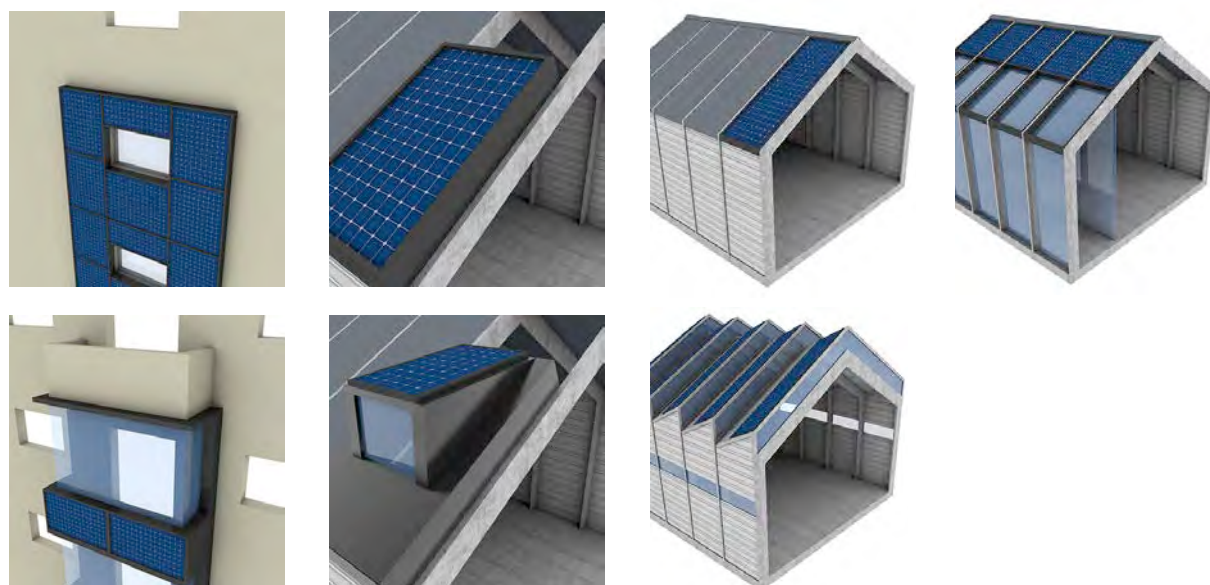
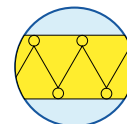


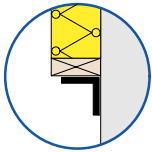
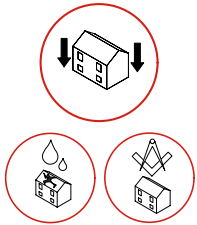
Fig. 57 Zones d'intégration possibles des panneaux solaires (adapté de Schwehr et al.) [82].



L'utilisation de panneaux solaires 'passifs', telle que décrite au § 4.4.3 (p. 59), est une autre approche permettant de profiter de l'énergie solaire grâce à la diminution des déperditions calorifiques par conduction à travers l'enveloppe. Le projet de Graz constitue un bon exemple d'application de cette technologie.

Quelles que soient les technologies solaires intégrées en usine dans les modules AIM-ES, il convient de tenir compte du risque de dégâts pendant le transport et la manipulation des éléments. Les possibilités de démontage sont également à étudier, car elles faciliteront le remplacement ultérieur des systèmes.

4.6 MONTAGE ET JONCTION DES MODULES

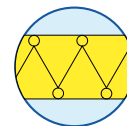
	QUESTIONS CLÉS <ul style="list-style-type: none"> • Dans quels éléments structuraux du bâtiment la façade AIM-ES sera-t-elle ancrée ? • Quelle est la configuration de cet ancrage (où les charges sont-elles reprises) ? • Quelles sont les charges à considérer ? • Quel est le système de support utilisé ? 	
	INFORMATIONS UTILES	
	Provenant de la programmation <ul style="list-style-type: none"> • Sur le plan légal : exigences de stabilité et de sécurité incendie • Contexte et climat : actions du vent, charge de neige 	
		Provenant de l'investigation <ul style="list-style-type: none"> • Type de structure du bâtiment existant • Type de fondations, type de sol • Type de dalle, type de murs • Emplacement des éléments structuraux, dimensions et caractéristiques (renforts, par exemple) • Accessibilité des éléments structuraux (y compris des éléments non visibles) • État des éléments structuraux

4.6.1 REMARQUES PRÉALABLES

Cette section décrit le **mode de fixation des modules de façade AIM-ES dans la structure existante**, une opération qui recouvre plusieurs aspects de conception classés en trois catégories au tableau 18.

Tableau 18 Points de conception importants pour le montage des éléments AIM-ES.

Au niveau du bâtiment : configuration du montage des modules (§ 4.6.3, p. 74)	Au niveau d'un module : types et distribution des appuis et des liaisons mécaniques (§ 4.6.4, p. 75)	Au niveau d'un appui : mode de fixation au bâtiment (§ 4.6.5, p. 77)
Comment les charges verticales et horizontales générées par le montage des modules sont-elles transmises à la structure existante ? Quel type de charge aura un impact, à chaque étage, sur le système d'ancrage des modules et sur la structure existante ?	Quel est le type d'appui utilisé (équerre, cheville, vissage dans une sous-structure, etc.) ? Comment les appuis sont-ils exactement positionnés autour d'un module ?	Quels sont les accessoires finaux de fixation (vis, tire-fonds, etc.) utilisés pour l'ancrage dans l'ouvrage existant ? Quels sont les risques de rupture au niveau de chaque fixation ?



4.6.2 CHARGES À PRENDRE EN CONSIDÉRATION

Les modules AIM-ES sont souvent conçus pour être autoportants afin de faciliter le transport et le montage. La conception structurale doit tenir compte des charges suivantes et de leur combinaison :

- charges verticales : poids permanent, neige et gel (eau de pluie en cas de toiture verte neuve)
- charges horizontales : pression et succion du vent
- charges horizontales et verticales : contraintes dimensionnelles dues au comportement thermique et hygroscopique
- charges non permanentes : sollicitations dues au processus d'assemblage
- (charges exceptionnelles pendant le transport du module).

Des informations supplémentaires concernant ces notions sont données dans l'Eurocode 0 [8] et dans l'Eurocode 1 [9]. À défaut d'un nouveau système de fondation, les modules de façade (et éventuellement les modules de toiture) engendrent inévitablement d'importantes contraintes sur la structure existante qu'il convient d'étudier attentivement (voir § 3.3.4, p. 31). Pour un module AIM-ES à base de bois présentant une valeur U de 0,13 W/m²K, on peut estimer un poids supplémentaire d'environ 85 kg/m² au niveau de la façade. En ce qui concerne les charges et le système de fixation prévus, deux situations peuvent se présenter : soit la structure existante est capable de supporter les charges de la nouvelle enveloppe, soit elle ne l'est pas. Si l'on prévoit le transfert direct des charges aux murs existants, l'étude de stabilité devra déterminer la capacité portante de ces derniers, nécessaire pour reprendre la masse supplémentaire et les forces excentrées.

4.6.3 MONTAGE ET REPRISE DE CHARGES

La structure existante et son état ont un impact important sur le choix de la configuration de montage et d'ancrage des modules. **Le concepteur devra définir le mode de fixation à la structure existante et le mécanisme de transmission des nouvelles charges horizontales et verticales** (le plus souvent via les dalles de plancher). Au pied du bâtiment, l'ancrage peut s'opérer dans la dalle du rez-de-chaussée, les modules étant posés sur une extension des fondations existantes ou sur une nouvelle fondation indépendante.

On distingue en général trois configurations de base :

- **montage sur pied** : les charges verticales qui résultent de la masse des modules sont supportées exclusivement par la dalle située en dessous du module
- **montage articulé** : les modules sont superposés et assemblés le plus souvent par emboîtement; les charges verticales sont transmises d'un module à l'autre, puis reprises à la base du bâtiment. Seules les charges horizontales sont supportées *in fine* par les dalles du rez-de-chaussée
- **montage distribué** : les charges verticales sont réparties sur les dalles de plancher situées juste en dessous et juste au-dessus de chaque module.

En combinant ces configurations de base avec l'une des deux orientations possibles (horizontale ou verticale), on obtient les cinq combinaisons illustrées à la figure 58 (p. 75).

Si les charges sont transmises en dernier ressort aux fondations du bâtiment, il faudra s'assurer que celles-ci sont aptes à les reprendre. Dans le cas contraire, un renforcement peut s'avé-

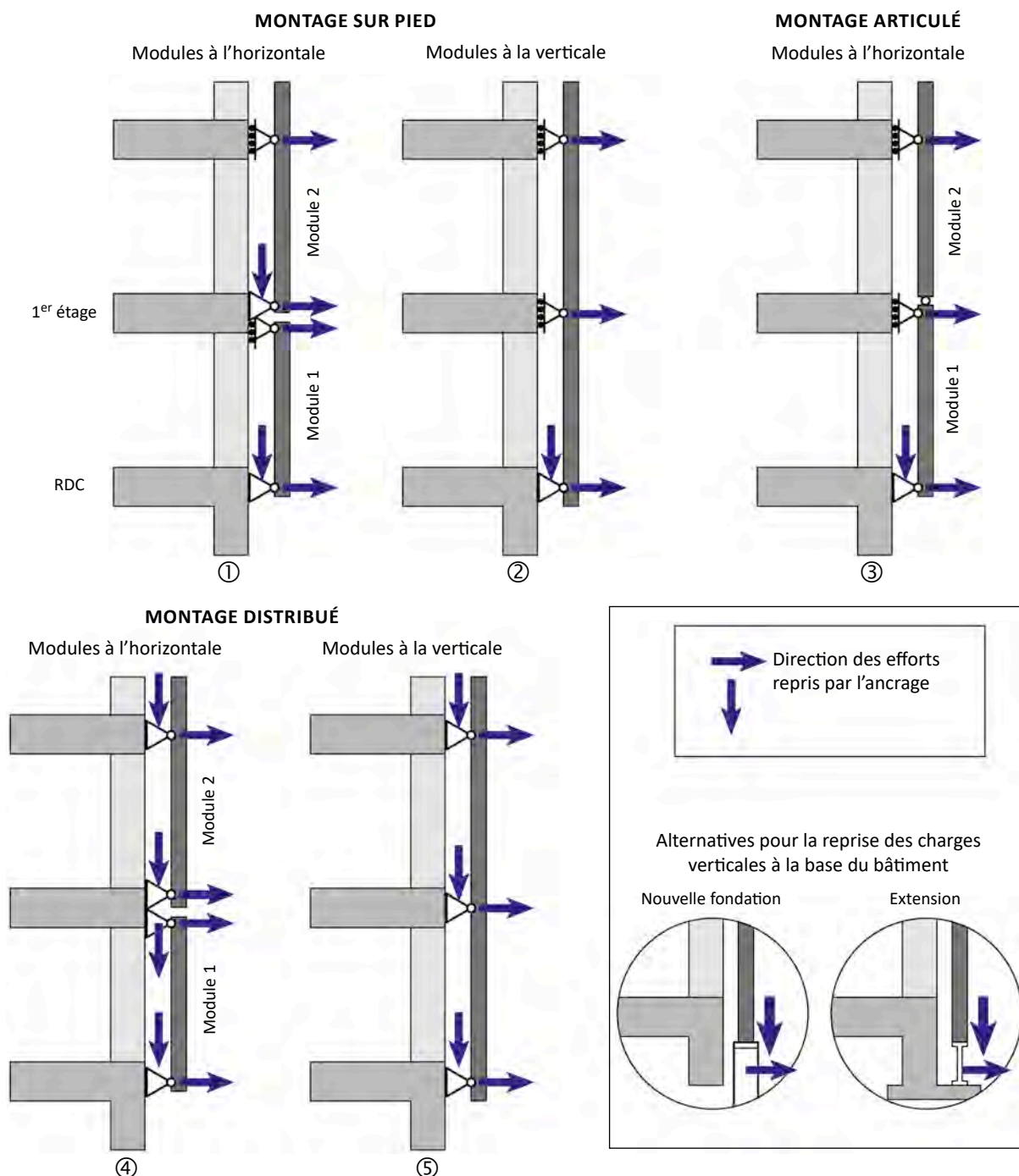
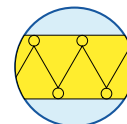


Fig. 58 Configurations de montage fréquentes et reprise de charges correspondantes (source : CSTC).

rer nécessaire. Les possibilités en matière de conception de la reprise de charges au bas du bâtiment sont présentées dans le deuxième rapport du projet smartTES [46].

4.6.4 TYPES ET DISTRIBUTION DES DISPOSITIFS DE LIAISON MÉCANIQUE

Le montage de la façade AIM-ES est défini par une configuration générale d'assemblage, mais aussi par un ensemble de dispositifs assurant la liaison mécanique de chaque module à la structure existante. On distingue deux systèmes de liaison (figure 59, p. 76) :

- les liaisons à point unique (principalement équerres renforcées, chevilles ou goujons)

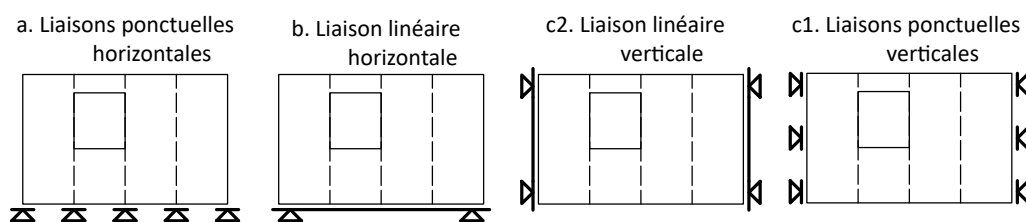
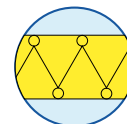


Fig. 59 Types de liaison mécanique (adapté de Latke et al.) [65].

- les liaisons linéaires, obtenues généralement en utilisant une sous-structure en bois sur laquelle les modules sont vissés à intervalle régulier.

De manière générale, plusieurs combinaisons d'accessoires de liaison produisent un transfert de charges final similaire dans la structure existante. De plus, dans un même bâtiment, les modules peuvent avoir des systèmes de liaison différents selon leur localisation dans l'ouvrage. Un même module peut également combiner plusieurs modes de liaison sur son pourtour.

La figure 60 illustre divers types de liaison mécanique pour des modules de façade verticaux.

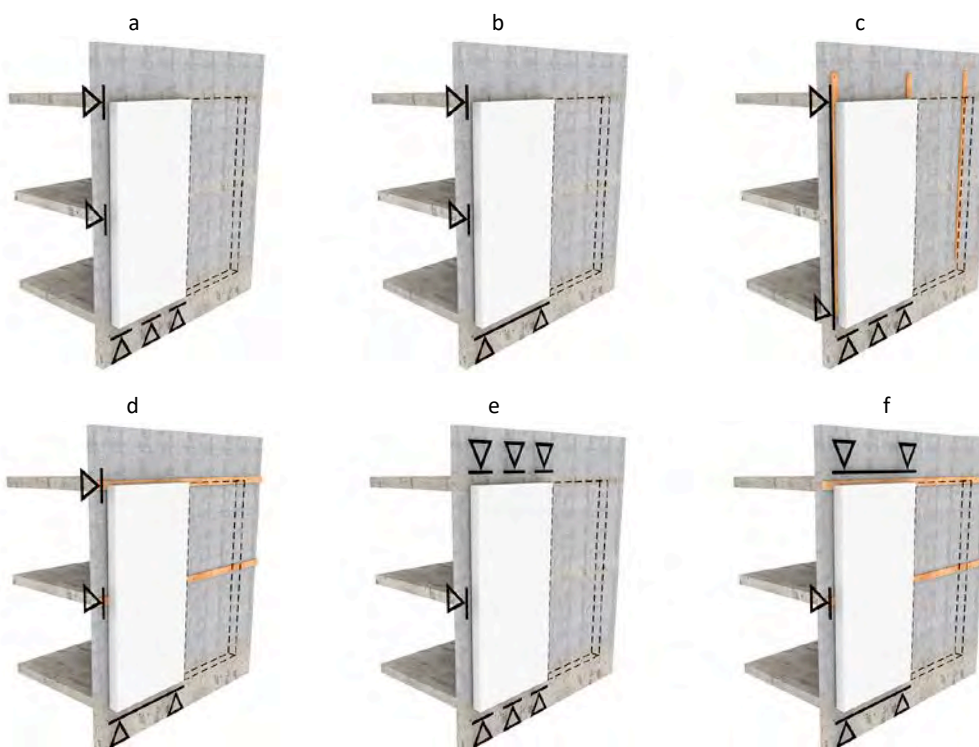
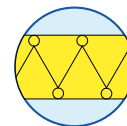


Fig. 60 Diversité des systèmes de liaison mécanique pour un module vertical (source : CSTC).

- Pas de sous-structure, liaisons ponctuelles horizontales dans le bas (grandes équerres, par exemple) et liaisons ponctuelles sur le bord latéral du module (petites équerres, par exemple)
- Pas de sous-structure, support linéaire horizontal dans le bas (poutre de support sur une nouvelle fondation, par exemple) et liaisons ponctuelles sur le bord latéral du module (petites équerres, par exemple)
- Sous-structure verticale, liaisons ponctuelles horizontales dans le bas (grandes équerres, par exemple) et liaison linéaire sur le bord latéral du module (vissage dans la sous-structure)
- Sous-structure horizontale, support linéaire horizontal dans le bas (poutre d'appui sur une nouvelle fondation, par exemple) et liaisons ponctuelles verticales sur le bord latéral du module (petites équerres, par exemple). Semblable à l'exemple b, avec les avantages de la sous-structure (moins de travail d'alignement pendant le montage)
- Pas de sous-structure, liaisons ponctuelles dans le bas (grandes équerres, par exemple), liaisons ponctuelles horizontales au sommet du module (petites équerres, par exemple) et liaison ponctuelle supplémentaire sur le bord latéral du module
- Sous-structure horizontale, support linéaire horizontal dans le bas (poutre d'appui sur une nouvelle fondation, par exemple), support linéaire horizontal au sommet du module (vissage dans la sous-structure) et liaison ponctuelle supplémentaire sur le bord latéral du module via la sous-structure



4.6.5 FIXATION À LA STRUCTURE DU BÂTIMENT

Pour tout ce qui a trait à l'ancrage dans un support solide et aux accessoires de fixation, la plupart des fabricants disposent de logiciels de calcul très performants. **Dans tous les cas, il est conseillé de tester les fixations sur chantier en raison de la qualité très variable des solutions existantes.** Il convient également de vérifier en permanence si la charge totale de l'élément d'ancrage peut être transférée à la structure existante sans risque de rupture. Le cas échéant, la configuration d'ancrage doit être modifiée.

4.6.5.1 Ancrage dans du béton solide

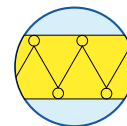
Le type de fixation utilisé pour l'ancrage dans le bâtiment dépendra toujours de l'état du support (dalle en béton, en général). Pour des informations détaillées au sujet de l'ancrage dans les structures en béton, on se référera à l'Eurocode 2 (partie 4) [10] et au Guide d'agrément technique européen ETAG 001 [70].

4.6.5.2 Ancrage dans une maçonnerie

Les murs de maçonnerie sont généralement constitués de blocs creux en béton ou en terre cuite. Lorsque des accessoires de fixation sont placés dans un élément creux, une partie du mécanisme d'ancrage n'est pas en contact avec le support. Pour compenser ce manque d'adhérence, une matrice peut être coulée localement dans la maçonnerie, créant ainsi un ancrage intégré qui peut être calculé de la même manière qu'un ancrage dans un élément plein. Dans tous les cas, il semble intéressant de prévoir dans la maçonnerie plusieurs ancrages de petite taille plutôt que quelques points d'ancrage rigides.

Tableau 19 Paramètres importants pour la conception de la configuration d'ancrage et des accessoires de fixation.

1. Propriétés et performance des matériaux <ul style="list-style-type: none">• Nature du support et des fixations (LCA, coût)• Performances (mécaniques, thermiques, etc.) du support et des fixations
2. Détails d'assemblage <ul style="list-style-type: none">• Types, emplacement et nombre d'appuis• Types, emplacement et nombre de fixations• Utilisation éventuelle d'une sous-structure• Mécanisme de défaillance des différentes parties d'une fixation
3. Réalisation <ul style="list-style-type: none">• Phase hors chantier<ul style="list-style-type: none">Intégrité structurale des modules AIM-ES pendant le transport• Phase de chantier<ul style="list-style-type: none">– Programme des opérations– Équipement nécessaire pour le levage et l'alignement des modules– Support temporaire jusqu'à la fixation finale (échafaudages)
Remarques : une nouvelle fondation pour supporter les modules AIM-ES permettra de reprendre toutes les charges verticales. Elle rend inutile le contrôle de la défaillance d'une fixation due à des charges ou à des mouvements verticaux, mais constitue toutefois une solution onéreuse.



4.6.6 REMARQUES CONCERNANT LES EXTENSIONS DU BÂTIMENT

Les extensions verticales ou horizontales des espaces requièrent des décisions plus complexes en ce qui concerne la configuration du transfert de charges. Il existe **différents types d'extensions et plusieurs modes de jonction entre la nouvelle structure et le bâtiment existant**. Un exemple de cette complexité est fourni à la figure 61. Ces points ne sont pas traités dans le présent document, mais des informations détaillées peuvent être trouvées dans le deuxième rapport du projet smartTES [46].

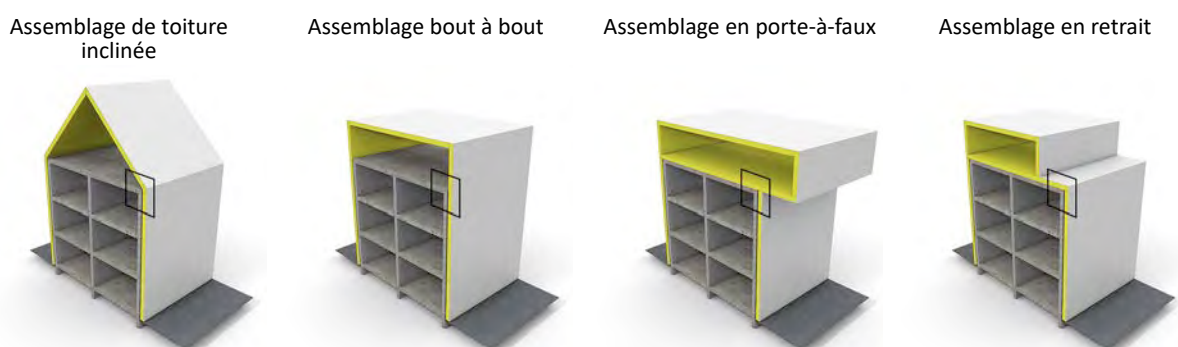


Fig. 61 Typologies d'extensions verticales et jonctions possibles avec le bâtiment existant (adapté de smartTES) [46].

4.6.7 JONCTION ENTRE MODULES

La jonction entre modules adjacents peut être réalisée de trois façons différentes (figure 63) :

- assemblage bout à bout
- assemblage à mi-bois (figure 62)
- assemblage à rainure et languette.

L'étanchéité à l'air de la jonction entre modules AIM-ES doit être assurée pour garantir l'efficacité énergétique (réduction de la pénétration du vent), la performance acoustique, la protection contre les intempéries et la sécurité incendie. En règle générale, un assemblage bout à bout sans étanchéité extérieure n'est pas satisfaisant. Sur chantier, il y a lieu de contrôler la qualité de la réalisation des joints. Ce point est essentiel pour la réception du bâtiment (voir § 6.2, p. 97).



Fig. 62 Assemblage à mi-bois et étanchéité à l'air par joint à lèvres en caoutchouc (Londres).

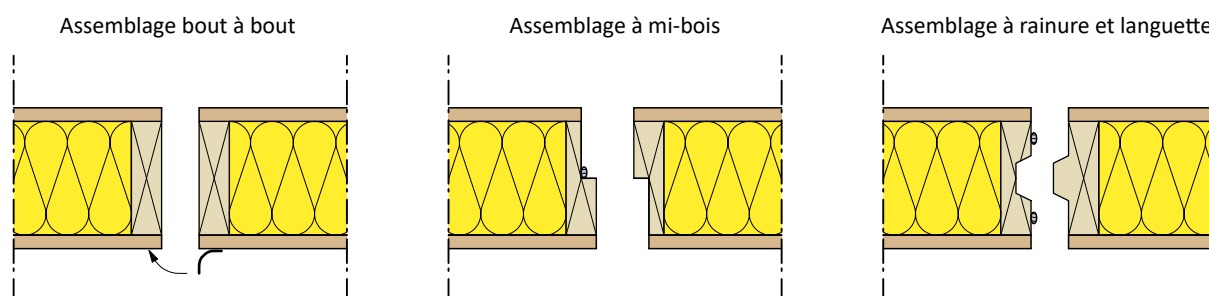
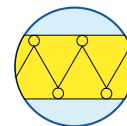


Fig. 63 Types de liaison d'éléments et d'étanchéité à l'air (adapté de Lattke et al.) [65].



4.6.8 EXEMPLES DE MONTAGE : ÉTUDES DE CAS EUROPÉENNES

4.6.8.1 Montage sur pied – Modules verticaux

Cette configuration est la plus fréquente pour les modules verticaux. Lors de la rénovation d'un grand immeuble à appartements à Kapfenberg, les murs existants ont été conservés et une sous-structure de fixation horizontale en bois a été posée au niveau des planchers d'étage (figure 64). Les grands modules verticaux ont été fixés latéralement à la sous-structure au moyen de petites équerres (fixation ponctuelle). Les charges verticales sont reprises au pied du bâtiment par une nouvelle fondation. À Riihimäki, les couches extérieures des murs sandwichs préfabriqués ont été enlevées avant l'installation d'une sous-structure de fixation similaire (figure 65). Une fondation supplémentaire a également été mise en œuvre avant le montage des modules pour supporter les nouvelles charges verticales.

Dans des maisons en rangée, à Roosendaal, le parement en briques des murs creux a été démolé et une extension de la fondation a été réalisée pour supporter les nouveaux modules de façade.

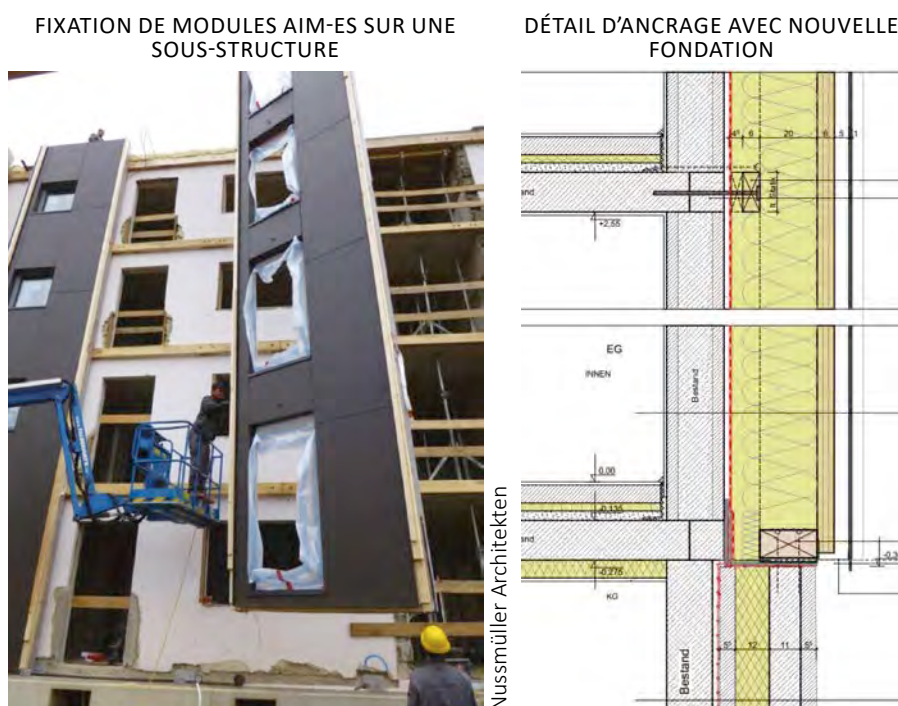


Fig. 64 Configuration de montage dans un immeuble à appartements à Kapfenberg [79].

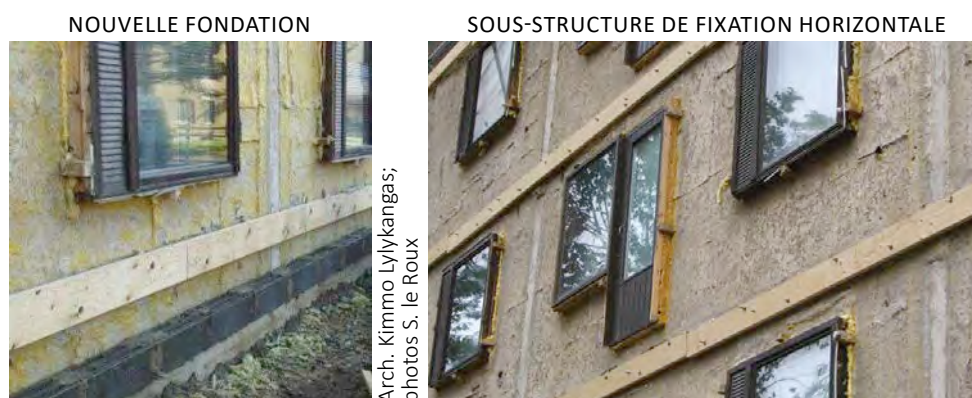
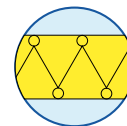


Fig. 65 Système portant de l'immeuble à appartements à Riihimäki.



4.6.8.2 Montage articulé – Modules horizontaux

Le montage articulé est couramment appliqué à l'étranger dans le cas de modules horizontaux. Ceux-ci sont superposés les uns aux autres (figure 66) et sont généralement assemblés par rainures et languettes. Dans le projet réalisé à Graz, de grandes consoles métalliques ont été incorporées au pied du bâtiment pour reprendre les charges verticales, et les modules ont été fixés sur une sous-structure en bois verticale (figure 67). L'espace entre les lattes de la sous-structure est rempli de laine minérale de manière à obtenir une couche d'égalisation sans vides d'air. Un isolant XPS supplémentaire recouvre la face avant des consoles métalliques afin de respecter la réglementation en matière de sécurité incendie. Dans le cas d'Augsburg, une fondation supplémentaire a été coulée pour supporter les modules, et une sous-structure horizontale a été fixée dans les dalles de plancher (figure 68). Un système d'assemblage à mi-bois assure la jonction des modules. On retrouve le même type de sous-structure et de liaison entre modules dans le projet de Londres. Des blocs de béton cellulaire à haute résistance reposent en outre sur de grandes consoles en acier pour servir de support au pied du bâtiment (figure 69).

En Belgique, sauf dérogations spéciales, la réglementation incendie interdit le montage articulé à portée multiétagée dans les immeubles moyens et élevés. L'intégrité du système de façade, qui doit être garantie même si un module prend feu, peut en effet s'avérer difficile à assurer, dans la mesure où les modules sont superposés les uns aux autres et que les charges sont reportées directement du panneau supérieur au panneau inférieur.

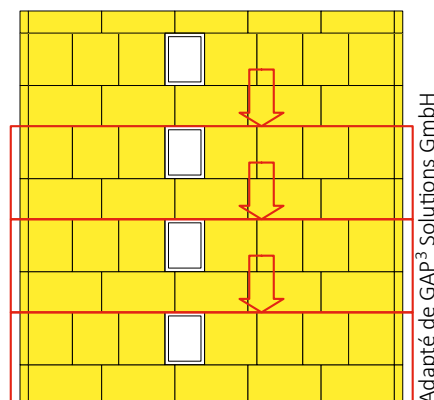
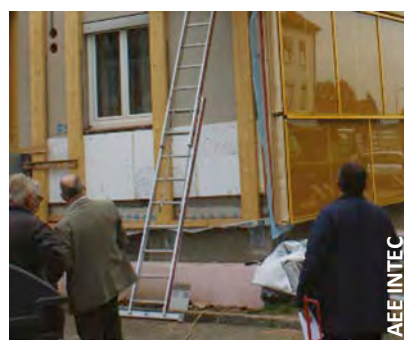


Fig. 66 Transfert de charges dans un montage articulé de modules horizontaux.

Sous-structure verticale



Grandes consoles pour la reprise des charges au pied du bâtiment

Fig. 67 Configuration de montage utilisée à Graz.

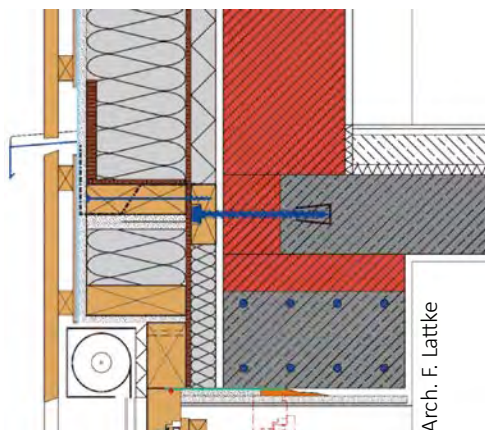
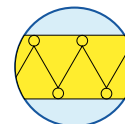


Fig. 68 Fixation de modules horizontaux sur une sous-structure à Augsburg : détail d'ancrage dans une dalle d'étage.



Fig. 69 Grandes consoles et blocs de béton cellulaire pour la reprise des charges verticales en pied de mur (Londres).



4.6.8.3 Montage distribué – Modules verticaux

La particularité de cette configuration pour des modules de façade verticaux réside dans l'utilisation d'un **système distribué d'éléments de liaison mécanique identiques** : les charges sont réparties de façon symétrique dans les dalles de structure du bâtiment.

Ce système de construction a été utilisé dans un immeuble à appartements à Berlin, où de grandes chevilles traversent la structure en bois du module et sont ancrées dans les dalles de béton (figure 70). Une grande poutre en bois est disposée au pied du bâtiment afin d'optimiser leur alignement. Les modules ont une portée de trois étages, ce qui constitue généralement un maximum en raison des limitations liées au transport.

4.6.8.4 Montage distribué – Modules horizontaux

On retrouve cette configuration de montage dans le projet de Pettenbach. Des éléments de liaison spécifiques reprennent les charges horizontales et verticales résultant du système TES ouvert (figure 71). Le dispositif est divisé en deux parties : l'une est ancrée dans la structure du bâtiment, l'autre est installée à l'arrière du module AIM-ES (figure 72, p. 82). Pendant l'assemblage, les deux parties sont réunies par un mouvement de glissement.

Assemblage d'un module AIM-ES sur une poutre d'alignement



Ancrage par chevilles



Fig. 70 Système de montage à Berlin [80].

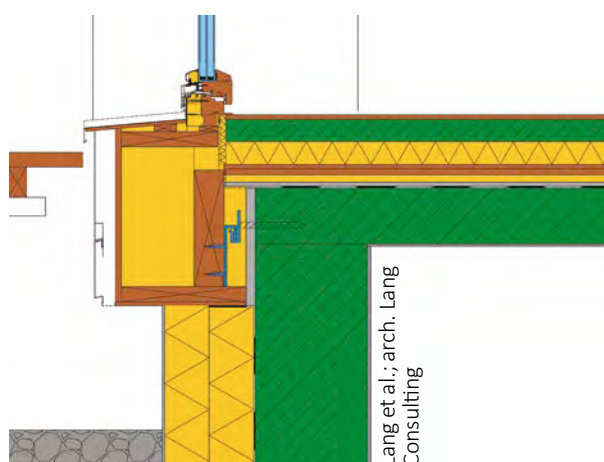
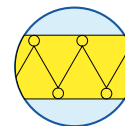


Fig. 71 Détail de la liaison mécanique des modules AIM-ES à Pettenbach [62].



Assemblage par glissement



Éléments de fixation placés sur un module AIM-ES



Lang et al.; arch. Lang Consulting

Fig. 72 Système de fixation utilisé à Pettenbach [62].

5. RÉALISATION DES MODULES ET MONTAGE SUR CHANTIER

5.1 RÉSUMÉ

Le choix d'un système d'enveloppe multifonctionnel industrialisé se traduit généralement, dans la pratique, par une diminution de la charge de travail sur chantier du fait de la préfabrication en usine. Ce chapitre présente un aperçu des différentes interventions à prévoir et quelques exemples pratiques issus de projets européens.



Comment organiser la fabrication et l'installation des modules AIM-ES pour garantir une performance finale optimale et de limiter la durée de la rénovation ?

5.2 EN USINE

5.2.1 PLANNING DE FABRICATION

TÂCHES

- Planifier la fabrication des modules minutieusement, afin d'utiliser un minimum de ressources et de limiter les ajustements sur chantier.

La planification de la fabrication des modules implique :

- de définir le niveau d'automatisation
- de choisir et d'optimiser les chaînes de montage
- de créer et de valider les modèles de fabrication
- d'optimiser le transfert d'informations entre les acteurs : centralisation des données, organisation du *workflow* entre le concepteur AIM-ES, le ou les fabricants et les sous-traitants
- de configurer correctement les machines de production à commande numérique (machines 'CNC')
- d'optimiser le flux et le stockage des matériaux et des sous-assemblages
- de commander les matériaux bruts
- d'organiser le stockage et le transport des modules prêts à être assemblés sur chantier.

Ajoutons que le producteur des modules AIM-ES peut faire appel à des logiciels de planification qui l'aideront à réaliser la plupart des tâches précitées, tout en optimisant les paramètres de coût, de temps et de reproductibilité.

5.2.2 PROTOTYPAGE

TÂCHES

- Prévoir le cas échéant une phase de prototypage permettant de mettre en évidence les problèmes éventuels lors de la mise en œuvre.
- Adapter le *design* des éléments problématiques ou la procédure de mise en œuvre.



Afin d'anticiper les problèmes qui pourraient survenir pendant la phase d'exécution sur chantier, des prototypes à l'échelle 1:1 peuvent être testés en atelier ou installés directement sur chantier. Une modification de la conception pourra ainsi être envisagée le cas échéant. À Kapfenberg, un module a été installé sur le bâtiment existant pour tester la conception choisie et le système de fixation (figure 73).

Une phase de test a également été prévue dans le cadre du projet de Roosendaal [60]. Deux maisons ont été rénovées à l'aide d'un système ETICS et une troisième au moyen d'éléments d'enveloppe préfabriqués en vue d'étudier les solutions d'un point de vue technique et d'identifier leurs avantages.



Fig. 73 Prototype de module installé à Kapfenberg avant la réalisation des travaux [52].

5.2.3 FABRICATION

TÂCHES

- Élaborer des plans de production.
- Fabriquer les modules jusqu'au niveau de préfabrication déterminé pendant la phase de conception.

Cette phase commence par l'élaboration de **dessins de fabrication** et de modèles sur la base de l'étude géométrique du bâtiment. Il importe ici de rappeler qu'**un modèle 3D peut comporter différents niveaux d'information** :

- le niveau le plus bas consiste en une simple visualisation/communication des données, avec un groupe de points dans l'espace, d'éventuelles interconnexions formant lignes ou surfaces et des caractéristiques de base (couleur, par exemple); un bon exemple de ce niveau est celui du nuage de points obtenu à l'aide du balayage au laser d'une façade
- au stade ultérieur, la géométrie 3D est segmentée en objets distincts (murs, dalles de plancher, etc.). Il est nécessaire de prévoir une phase de modélisation pour extraire les formes géométriques à partir d'un modèle brut. Cette méthode, rarement automatisée, demande du temps et certaines aptitudes. Le grand avantage de la sémantisation du modèle en objets architecturaux concrets est qu'elle permet d'attribuer certaines caractéristiques à chacun d'eux et de créer un modèle numérique. C'est ce qu'on appelle la **modélisation intelligente** ou *Building Information Modelling* (BIM). Les caractéristiques pouvant être attribuées à un élément de construction sont nombreuses : type de matériau, données LCA, propriétés thermiques, etc.
- à un niveau supérieur, le degré de détail peut atteindre une approche '4D', incluant des aspects liés au temps et au planning, voire une évaluation des coûts et de la gestion du budget ou la création automatique de bons de commande.

Les avantages d'une approche BIM sont importants dans la planification de la production et du montage des modules AIM-ES. Dans un logiciel CAO orienté sur l'objet, un fabricant de modules AIM-ES à base de bois peut le plus souvent :

1. importer la géométrie du bâtiment existant dans l'environnement de modélisation
2. générer la distribution des modules autour de la géométrie du bâtiment existant et établir la configuration de toutes les ossatures en bois des modules



3. à partir du point 2, déterminer tous les types de raccords bois-bois, bois-béton ou bois-maçonnerie et les assemblages correspondants
4. à partir des points 2 et 3, créer des données FAO (instructions pour les machines à découper, par exemple)
5. créer une liste de données : dimensions et quantités de matériaux d'ossature prédécoupés, d'éléments de fixation, etc.

Les étapes 2, 3, 4 et 5 peuvent être en grande partie automatisées grâce à des outils numériques.

Dès que les dessins de fabrication sont validés, la production des modules peut commencer (figure 74). Dans le cas d'une conception basée sur la structure, cela comprend l'assemblage du cadre structurel et des panneaux ainsi que la pose de l'isolant s'il s'agit d'un système fermé. L'intégration des châssis et des systèmes doit être rigoureusement planifiée et adaptée aux machines disponibles. Il convient d'optimiser l'ensemble du processus d'assemblage et d'anticiper tous les problèmes éventuels. Là encore, les solutions numériques permettent la détection automatique d'erreurs (*clash detection*). Dans le cas des modules AIM-ES à base de bois, tout le processus est basé sur les méthodes 'traditionnelles' de l'industrie de la construction à ossature bois et sur ses procédures de contrôle de la qualité.

La phase de fabrication des solutions basées sur l'ossature comprend les tâches suivantes :

- contrôle des matériaux de départ
- contrôle des systèmes à intégrer (fenêtres, conduits, etc.)
- découpage et usinage des éléments d'ossature
- assemblage de l'ossature
- pose d'un panneau sur un côté de l'ossature
- le cas échéant, intégration des fenêtres et assemblage des systèmes intégrés
- intégration des couches d'isolation (facultatif si l'isolation est injectée sur chantier)
- intégration des couches techniques additionnelles à l'intérieur du module (facultatif)
- pose d'un panneau de l'autre côté de l'ossature (facultatif en cas de module TES ouvert)
- le cas échéant, intégration de la ou des membranes techniques (figure 75)
- intégration des joints et autres barrières d'étanchéité à l'air
- intégration des éléments de la couche de revêtement (facultatif si l'intégration est prévue sur chantier).

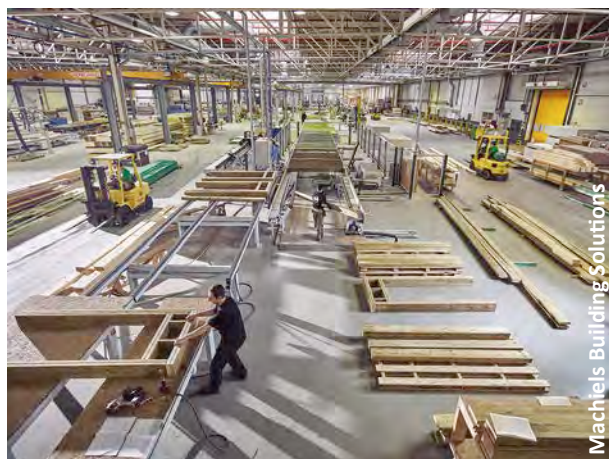


Fig. 74 Assemblage en usine de modules AIM-ES.



Fig. 75 Intégration d'une membrane technique (projet de rénovation expérimentale Mutatie+).



Toute la procédure s'accompagne :

- d'un inventaire et d'une validation des écarts par rapport aux spécifications des produits
- des procédures de contrôle de qualité.

Il convient d'accorder une attention particulière à la protection des éléments fragiles pendant le transport.

5.3 SUR CHANTIER

5.3.1 PLANIFICATION ET COORDINATION DES INTERVENTIONS SUR CHANTIER

TÂCHES

- Planifier minutieusement les interventions de façon à :
 - limiter l'usage des ressources
 - optimiser la durée des opérations
 - limiter les ajustements sur chantier
 - limiter l'impact sur les occupants.

La **coordination des acteurs impliqués** est cruciale. Cette phase nécessite :

- de planifier l'enchaînement des interventions avec tous les acteurs concernés (figure 76), en veillant à limiter le nombre d'interventions d'un même acteur et à réduire les temps morts sur chantier. Il est recommandé d'établir un planning très détaillé et de développer une approche 'lean' [34, 85]. Cette organisation sera d'autant plus critique s'il existe une grande répétitivité dans les interventions, comme c'était le cas à Roosendaal où de nombreuses maisons identiques ont été rénovées (figure 77, p. 87)
- d'optimiser le transfert d'informations en centralisant les moyens de communication (plans, modèles numériques, registre des interventions, spécifications des produits, etc.) et en organisant le flux de l'information entre acteurs

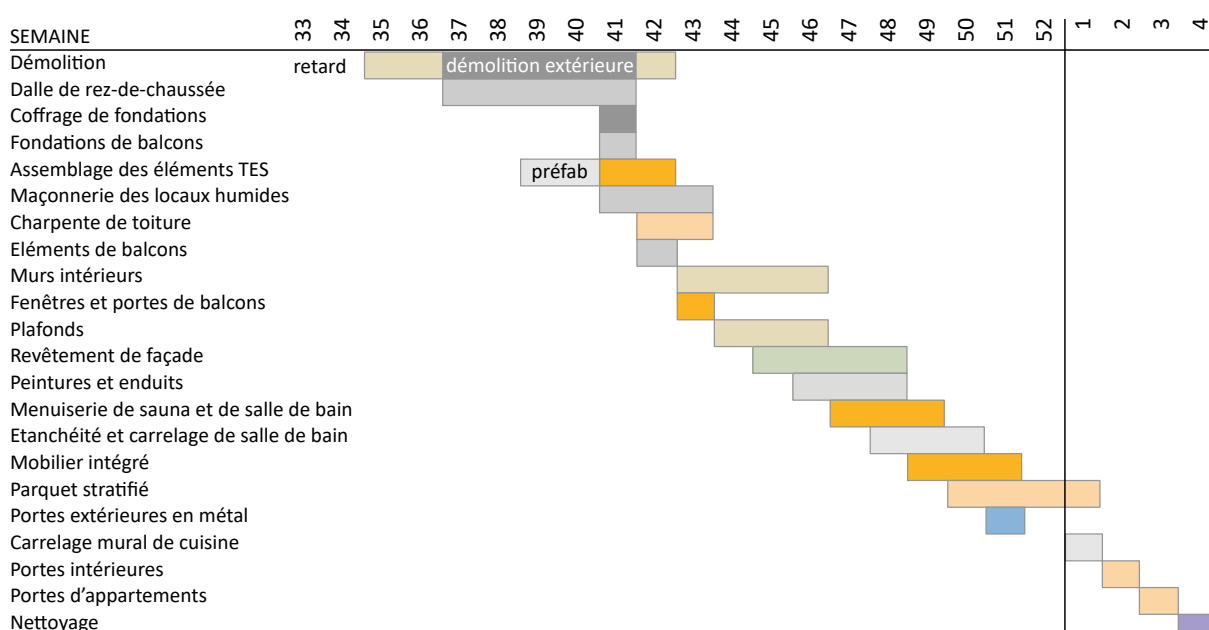


Fig. 76 Exemple de planification des interventions sur chantier à Oulu (adapté de m3 Architects) [66].

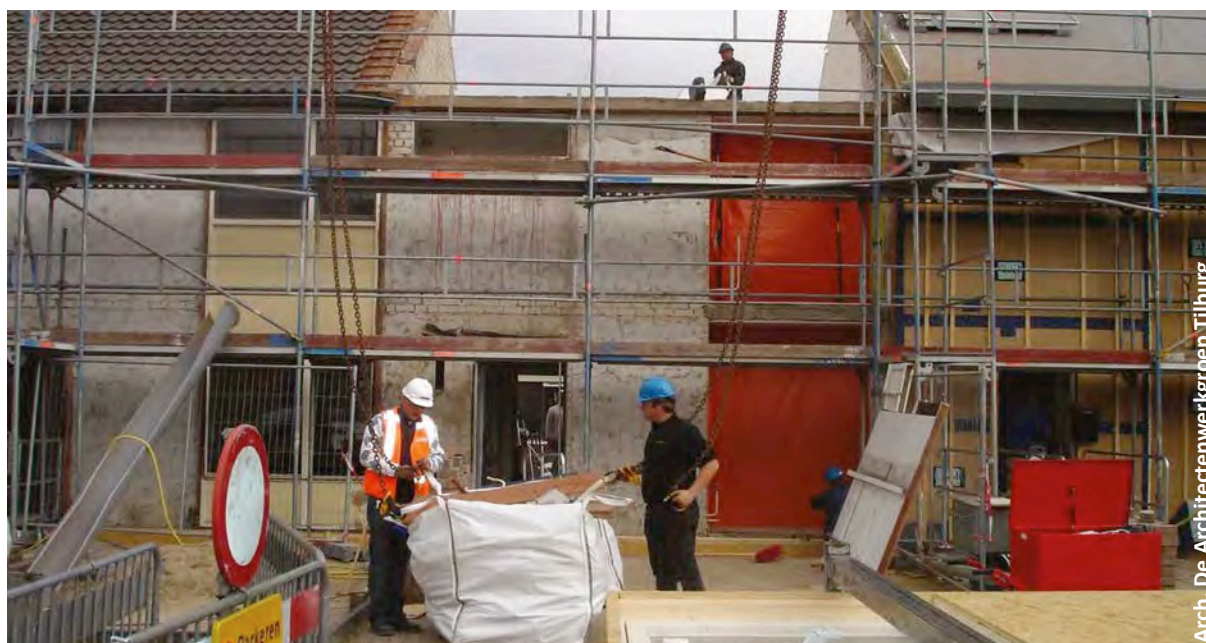


Fig. 77 Exemple de segmentation des opérations à Roosendaal [90].

Jour 1	Enlèvement du parement du mur creux
Jour 2	Rénovation des fondations par l'extérieur
Jour 3	Durcissement du béton
Jour 4	Déconnexion des installations existantes
Dernier jour	Enlèvement des châssis et de la couverture de toiture, puis installation des modules de façade et de toiture

- d'optimiser l'espace disponible grâce à une bonne gestion du chantier, afin de favoriser la logistique pendant les opérations : prévoir de la place pour le stockage, pour le déplacement du personnel et du matériel, pour l'utilisation des grues (rayon d'action, lieux d'implantation)
- le cas échéant, de concevoir les échafaudages : dimensions, éléments constitutifs et mise en œuvre, distance par rapport au mur existant, remodulation éventuelle des dispositifs en cours de chantier
- de rationaliser l'usage des équipements (grues, par exemple) et des infrastructures (échafaudages, par exemple) pour les différentes équipes
- de prévoir la logistique pour les livraisons, le déchargement et le stockage des matériaux, des équipements et des modules (voir § 5.3.5.2, p. 92)
- de dresser la liste de toutes les sources potentielles de danger pour les occupants et le personnel, et de prévoir des mesures de sécurité adéquates
- de valider périodiquement les interventions sur chantier
- de mettre au point une communication claire avec les occupants à propos du planning et des désagréments possibles
- d'installer et de sécuriser le chantier de rénovation.

Trois risques principaux liés à l'exécution sur chantier ont été identifiés pendant le projet 'E2Rebuild' [66] :

- la dépendance vis-à-vis des conditions climatiques
- la complexité : sous-estimation des détails et manque de coordination durant la phase de planning
- le risque de conflit en raison des perturbations multiples des occupants (blocage des voies d'accès, par exemple).



5.3.2 DISPOSITIONS PRATIQUES RELATIVES AUX OCCUPANTS PENDANT L'INTERVENTION

TÂCHES

- Prendre les mesures nécessaires afin de perturber le moins possible le milieu de vie des occupants.

Grâce à une phase de chantier plus courte et à la réduction des opérations destructives, l'approche AIM-ES permet de limiter les nuisances pour les occupants. Toutefois, si la rénovation nécessite des travaux lourds, on peut envisager un relogement (temporaire ou pendant toute la durée des travaux). Pour les interventions à l'intérieur du bâtiment (enlèvement des fenêtres, par exemple) ou les opérations destructives sur l'enveloppe extérieure, il y a lieu de prévoir des mesures de protection. En résumé :

- il convient, le cas échéant, d'organiser le relogement des occupants (durée et modalités)
- si aucun relogement n'est prévu – solution à privilégier avec les modules AIM-ES –, on prendra les dispositions nécessaires pour :
 - garantir un accès sécurisé au bâtiment et aux appartements
 - limiter l'impact des travaux sur l'utilisation du bâtiment par les occupants
 - assurer la sécurité des occupants
 - limiter les nuisances sonores
 - protéger l'espace intérieur (figure 78).



Fig. 78 Écran antipoussière pour la protection des espaces intérieurs pendant les travaux sur chantier (Berlin) [80].

5.3.3 PRÉPARATION DU BÂTIMENT

TÂCHES

- Préparer le bâtiment à recevoir les modules de façade en planifiant et en menant des interventions destructives et/ou en réalisant des travaux d'amélioration.
- Assainir le bâtiment avant d'installer les modules et les équipements techniques.
- S'assurer qu'aucune pathologie n'est présente.

5.3.3.1 Interventions destructives

La préparation du bâtiment peut nécessiter un certain nombre d'interventions plus ou moins destructives, telles que :

- l'enlèvement de fils, câbles et boîtiers (électricité, éclairage de rue, etc.)
- le démontage d'éléments extérieurs, tels que cheminées, descentes d'eau, balcons, etc. (figure 79, p. 89)
- le démantèlement complet du mur extérieur (optionnel, non étudié dans le présent document)
- le démantèlement partiel du mur extérieur, par exemple : couche extérieure des panneaux sandwichs existants (figure 80, p. 89), parement d'un mur creux (figure 81, p. 89)
- l'élimination ou l'égalisation de petites irrégularités (jusqu'à quelques millimètres) à l'aide d'un enduit ou autre



Fig. 79 Découpage d'anciens balcons à Augsburg.



Fig. 80 Démontage partiel des murs sandwiches à Riihimäki [56].



Fig. 81 Démantèlement partiel d'un mur creux à Roosendaal [76].

- la dépose ou l'adaptation d'éléments comme des appuis de fenêtre, des seuils de porte, des marches d'escalier, des décors de grandes dimensions
- le déblaiement d'une couche de terre pour accéder à la fondation
- l'enlèvement d'éléments de fenêtres ou de portes (si cela s'avère impossible après le montage de la nouvelle façade)
- l'ajustement de la taille des baies
- le retrait ou le débranchement (temporaire ou définitif) d'équipements techniques du bâtiment.

L'enlèvement des châssis est une phase critique. On veillera à maintenir les fenêtres existantes en place le plus longtemps possible, et ce même après avoir installé les modules de façade avec les nouvelles fenêtres intégrées. Cependant, dans certains cas, la position des fenêtres existantes empêche l'installation des modules ou leur démontage est impossible par l'intérieur en raison des détails constructifs. En cas de retrait précoce, il conviendra de prévoir des moyens appropriés pour protéger les occupants du bruit, de la température extérieure, de la poussière, etc.



5.3.3.2 Traitement des pathologies

Pour garantir une rénovation durable, toutes les pathologies identifiées pendant la phase d'investigation (voir § 3.3.1.1, p. 28) doivent être traitées, qu'il s'agisse de dégâts dus à l'humidité, de défauts de construction des linteaux, de fissures dans la façade ou les éléments structuraux, de la corrosion d'éléments métalliques (ancrages d'un mur creux, par exemple), etc. De nombreuses interventions doivent être réalisées de préférence avant le montage des modules, dans la mesure où ces derniers peuvent limiter l'accessibilité. À noter que les traitements contre l'humidité présente dans la masse des murs existants nécessitent souvent un délai de séchage suffisant, qui peut être fortement allongé par la présence des modules de façade. L'état des éléments structuraux constitue un autre aspect important auquel il convient de s'attarder en prévoyant des solutions permettant de garantir la sécurité structurale et de limiter les problèmes lors de l'ancrage des modules.

Il y a lieu également d'assurer un contrôle adéquat de la qualité des interventions par des experts spécifiques.

5.3.3.3 Travaux d'amélioration et travaux préparatoires

A. Structure et enveloppe

La rénovation de la structure et de l'enveloppe peut nécessiter certaines interventions préalables telles que :

- le préemplissage des murs creux, dans le cas où la paroi extérieure est maintenue
- la fixation de la paroi extérieure existante là où les attaches du mur de briques sont corrodées ou risquent de se dégrader ultérieurement
- le renforcement de la structure portante
- la pose d'un support d'alignement temporaire ou définitif
- le montage d'une couche d'adaptation
- la mise en œuvre de nouveaux éléments portants tels que consoles, fondations supplémentaires (figure 82), nouvelles fondations, etc.
- la préparation de l'ancrage des modules.



Fig. 82 Mise en œuvre d'une nouvelle fondation dans le cadre d'un projet de rénovation expérimentale Ecoren.



B. Espaces intérieurs et équipements techniques

Les interventions suivantes peuvent être envisagées :

- forage d'orifices pour les nouveaux systèmes de ventilation (figure 83)
- raccordement des câbles électriques aux endroits requis
- installation des dispositifs de protection des espaces intérieurs
- adaptation des espaces intérieurs pour garantir l'accès des occupants
- fixation de câbles ou de petits conduits dans une zone spécifique des murs existants.



Fig. 83 Orifice foré dans un mur existant pour raccorder un conduit de ventilation (projet de rénovation expérimentale Ecoren).

5.3.4 DISPOSITIONS PRATIQUES RELATIVES À LA PROTECTION CONTRE L'HUMIDITÉ PENDANT L'ASSEMBLAGE

TÂCHE

- Veiller à protéger les éléments de la nouvelle enveloppe contre la pluie et tout autre dégât dû à l'humidité.

Nombre de matériaux constituant les éléments d'enveloppe préfabriqués sont sensibles à l'humidité et sont susceptibles d'être humidifiés pendant la phase d'assemblage. Il y a donc lieu de les protéger temporairement contre les intempéries (figure 84). À cet égard, le quatrième rapport publié dans le cadre du projet smartTES attire l'attention sur les points suivants [49] :

- plus les modules intègrent de couches de finition, plus il peut s'avérer délicat de les protéger durant le transport, le stockage et l'assemblage, car les conditions de séchage sont moins favorables qu'avec des modules dépourvus d'isolation et de barrière à la vapeur. Il est donc recommandé, en présence de ce type de modules, de prévoir un assemblage rapide sur chantier
- les éléments de façade situés dans la partie supérieure du bâtiment étant en règle générale plus exposés aux infiltrations d'eaux de pluie, il convient de les protéger de manière adéquate, en particulier si l'assemblage des modules s'étend sur plus d'une journée



Fig. 84 Protection des modules avant la mise en œuvre du revêtement à Oulu [67].



- le montage d'une sous-structure en bois (souvent nécessaire pour la pose de la couche d'adaptation) peut aussi s'avérer délicat, surtout si l'on prévoit une longue exposition aux intempéries avant l'installation des modules.

5.3.5 MONTAGE DES MODULES DE FAÇADE

TÂCHES

- Livrer et stocker les modules de façade.
- Monter et ancrer les modules suivant les prescriptions du concepteur.
- S'assurer que les modules sont correctement protégés pendant la phase d'assemblage.

5.3.5.1 Conditions préalables

Le montage des modules AIM-ES peut commencer dès que les conditions suivantes sont remplies [64] :

- la fabrication est terminée
- la coordination de la main-d'œuvre pendant l'assemblage est assurée
- le programme des interventions sur chantier est validé
- les plans d'assemblage sont prêts
- l'accès au chantier et au bâtiment est garanti (transport et assemblage possibles)
- l'infrastructure du site est prête (grues, par exemple)
- les points d'accroche temporaires sur les modules de façade sont définis (crochets ou sangles de fixation pour les grues, poignées pour l'alignement manuel, etc.)
- l'impact de chaque activité sur chantier a été analysé
- les points de support et de fixation sur la structure existante ou la sous-structure préalablement installée sont définis
- la capacité portante de la structure existante et les risques de rupture de l'ancrage ont été contrôlés
- le démontage des façades, des balcons et des fondations est terminé
- les interventions de mise à niveau requises sont terminées
- la gestion des risques et les responsabilités des acteurs sont définies.

5.3.5.2 Transport et stockage

Le transport des modules de l'usine au chantier doit être planifié en fonction des rythmes de production, de la progression de l'assemblage sur site et des capacités de stockage. La planification doit prendre en compte :

- les modalités de transport depuis les chaînes de montage jusqu'au lieu de stockage en usine
- les modalités de transport du lieu de stockage en usine au chantier de rénovation :
 - fréquence de livraison en fonction de l'avancement du montage et de la capacité de stockage sur chantier
 - type de camion utilisé pour le transport (voir ci-après)
 - équipement de chargement et de déchargement (figure 85, p. 93)
 - nombre de camions nécessaire pour une livraison.

Il est important de **bien étudier l'itinéraire de transport et les obstacles potentiels lorsqu'il**



Fig. 85 Chargement des modules en vue de leur livraison sur le chantier à Roosendaal [90].

s'agit d'éléments de façade de grandes dimensions. Normalement, ceux-ci ont été fabriqués en tenant compte de l'accessibilité au chantier, mais il convient d'examiner au préalable tous les risques de blocage du convoi de livraison (y compris les obstacles temporaires qui n'ont peut-être pas été identifiés pendant les études préliminaires).

Les règles générales sur le transport au sein de l'UE définies dans la directive 96/53/CE [63] fixent les dimensions et le poids maximaux des camions (tableaux 20 et 21). Ces informations doivent être intégrées dans le processus de conception afin de limiter la taille et le poids des modules en fonction de l'itinéraire entre l'usine et le bâtiment considéré. La directive précitée introduit un 'concept modulaire' (EMS – *European Modular System*) pour les camions de transport, qui permet d'augmenter la longueur et le poids du véhicule sur certains réseaux routiers, à condition d'utiliser des configurations de train routier 'standard' (figure 86, p. 94). Si ce concept est appliqué en Belgique, les configurations de camions les plus longues (et les plus lourdes) ne devront être envisagées que pour les longues distances et non pour une livraison finale dans un contexte urbain.

Tableau 20 Dimensions maximales autorisées pour les camions de transport.

HAUTEUR	LARGEUR	LONGUEUR		
		Camion ou remorque	Train routier	Véhicule articulé
4 m	2,55 m	12 m	18,75 m	16,50 m

Tableau 21 Poids maximal autorisé pour les camions de transport.

Poids par essieu porteur	Poids par essieu moteur	Camion 2 essieux	Camion 3 essieux	Train routier 4 essieux	Train routier 5 essieux et +	Véhicule articulé 5 essieux et +
10 t	12 t	19 t	26 t	39 t	44 t	44 t

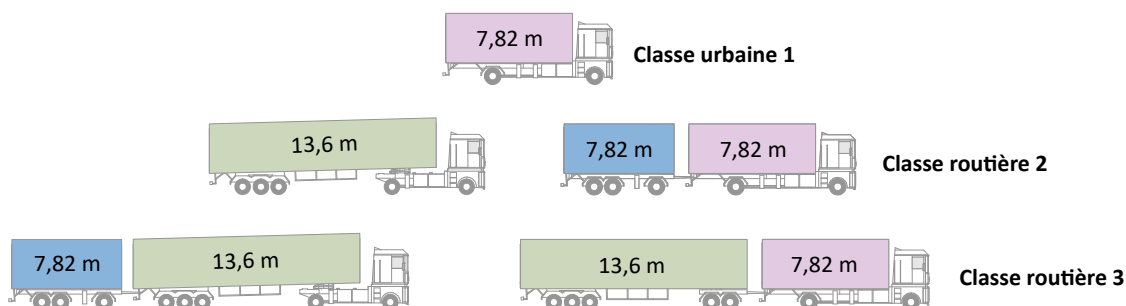


Fig. 86 Exemples de configurations de 'mégacamions' basées sur le concept EMS qui pourraient être autorisées à l'avenir en Belgique (adapté de Larsson) [63].

Pour la rénovation d'une maison à Roosendaal, les modules AIM-ES ont été fabriqués à 250 km du chantier. L'ensemble des 134 éléments préfabriqués ont été transportés dans un camion qui a voyagé de nuit en vue d'une installation le lendemain.

5.3.5.3 Levage et fixation

L'installation des modules en face de leur lieu de montage final nécessite des manipulations à l'aide de grues mobiles ou fixes. Il est dès lors nécessaire de prévoir des points de fixation temporaires sur les éléments pour pouvoir les manipuler et les lever (figure 87). Ainsi, à Berlin, des poutres en bois temporaires ont été fixées aux modules, car ceux-ci étaient difficilement accessibles avec la grue. Il convient également de placer des poignées pour que les ouvriers puissent manipuler les modules (lors de l'alignement, par exemple). L'engin de levage doit être adapté au poids de l'élément le plus lourd, aux dimensions de l'élément le plus grand et au positionnement le plus haut à atteindre. Rappelons que *si l'on prévoit l'installation de modules à la verticale, une opération de basculement sera nécessaire* (figure 88, p. 95). Les modules AIM-ES doivent toujours être conçus pour résister à la charge appliquée pendant le transport et le montage. Pour les modules présentant un haut niveau de préfabrication, la phase de montage peut être très rapide. Dans le cadre du projet de Graz, une façade de 4 étages a été assemblée en une demi-journée (figure 89, p. 95).

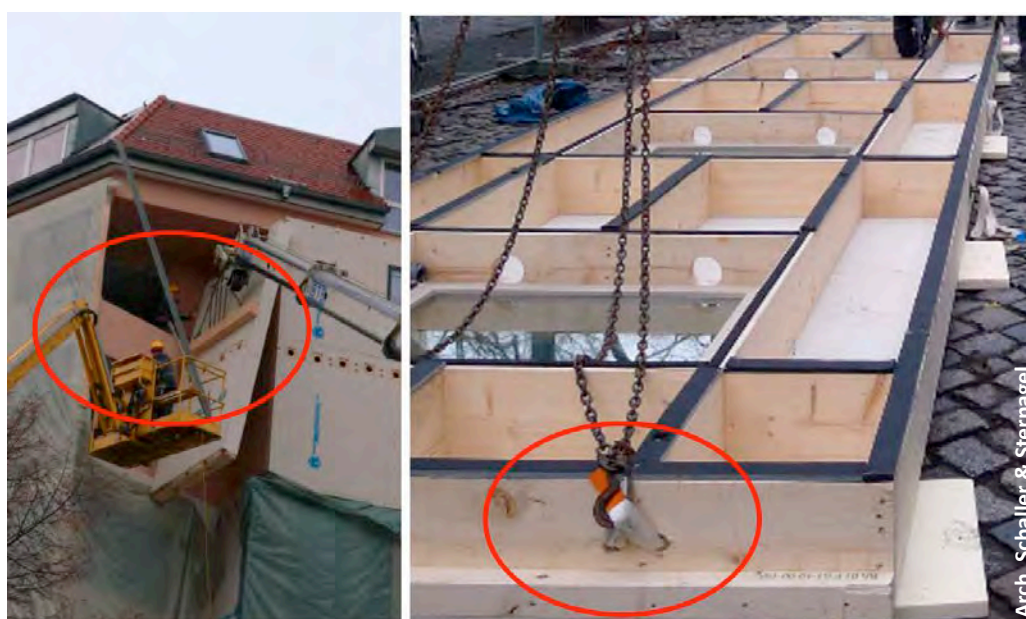


Fig. 87 Point de fixation temporaire pour la préhension et le levage par la grue à Berlin [80].



Fig. 88 Basculement d'un module à Riihimäki [56].



Fig. 89 Processus d'assemblage à Graz.



5.3.6 TRAVAUX SUPPLÉMENTAIRES – TRAVAUX DE FINITION

TÂCHE

- Réaliser toutes les opérations requises pour parachever la rénovation.

L'ampleur des travaux supplémentaires et des travaux de finition dépend du niveau de pré-fabrication du système AIM-ES. Voici quelques interventions possibles, selon les choix de conception :

- enlèvement de fenêtres existantes par l'intérieur
- injection d'un isolant en vrac (isolation principale ou couche d'adaptation pour les modules ouverts) (figure 90)
- installation d'éléments de liaison :
 - module-module, module-toiture, toiture-toiture
 - joints de mouvement et d'étanchéité à l'air
- placement des membranes extérieures, du revêtement et des finitions (figure 91)
- pose d'équipements extérieurs (panneaux solaires, balcons, avant-toits, ...) (figures 92 et 93)
- pose de dispositifs de protection des angles
- installation de groupes de ventilation décentralisés
- travaux de finition intérieurs (rappelons que les raccords d'étanchéité au niveau des châssis intégrés aux modules de façade sont essentiels)
- opérations de nettoyage.

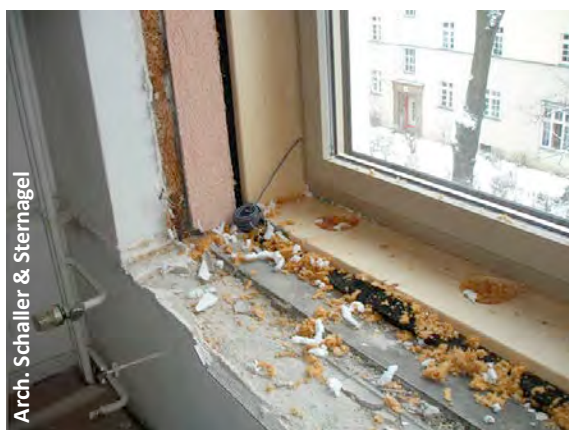


Fig. 90 Injection d'isolant dans un module TES ouvert à Berlin [80].



Fig. 91 Fixation sur chantier de la finition extérieure à Roosendaal [76].



Fig. 92 Éléments architecturaux supplémentaires fixés sur les modules à Riihimäki [56].



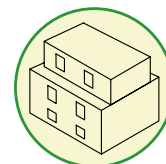
Fig. 93 Installation de panneaux photovoltaïques à Pettenbach [62].

6. EXPLOITATION DU BÂTIMENT RÉNOVÉ

6.1 RÉSUMÉ

Ce dernier chapitre décrit les étapes qui suivent les opérations de rénovation et qui consistent :

1. à vérifier si le travail a été effectué correctement
2. à s'assurer que le bâtiment atteint ou atteindra les performances prévues
3. à prendre en parallèle les mesures de prévention et de correction nécessaires
4. à planifier l'entretien des systèmes.



Comment s'assurer que le bâtiment rénové au moyen des modules AIM-ES atteint les performances prévues ?

Le propriétaire et l'équipe du projet doivent garder ces mesures de postconstruction à l'esprit dès le début du projet.

6.2 RÉCEPTION DES TRAVAUX

TÂCHE

- Évaluer la conformité de la mise en œuvre des modules aux documents contractuels.

Il est important que la qualité finale et les performances visées en matière de durabilité, de consommation énergétique et d'environnement intérieur soient connues des différents acteurs du projet avant la phase de fabrication. Ces exigences doivent se traduire en partie en quantités mesurables – teneur de l'air en polluants, température de surface, niveaux U, débits d'infiltration d'air, etc. – qui pourront être contrôlées par des équipes désignées après la rénovation. Bien entendu, le contrôle de la qualité est une procédure qui s'étend sur l'ensemble du projet; le contrôle final n'en est que l'aboutissement.

Les actions à mener dans le cadre de la réception des travaux doivent inclure la vérification des prescriptions de mise en œuvre formulées par le concepteur et le fabricant des modules AIM-ES; cette vérification peut s'effectuer sur la base d'une liste de points essentiels à contrôler (étanchéité à l'air, protection contre l'humidité, alignement des modules).

Les méthodes d'investigation comprennent entre autres :

- l'inspection visuelle
- les études de photogrammétrie
- le test d'infiltrométrie
- la thermographie (figure 94, p. 98)
- les mesures locales du taux d'humidité.

Pour les modules AIM-ES ouverts, il est particulièrement important de vérifier la conformité de l'insufflation de l'isolant. Des discontinuités dans la couche d'isolation, dues au tassement différentiel, pourront être mises en évidence par une inspection thermographique.

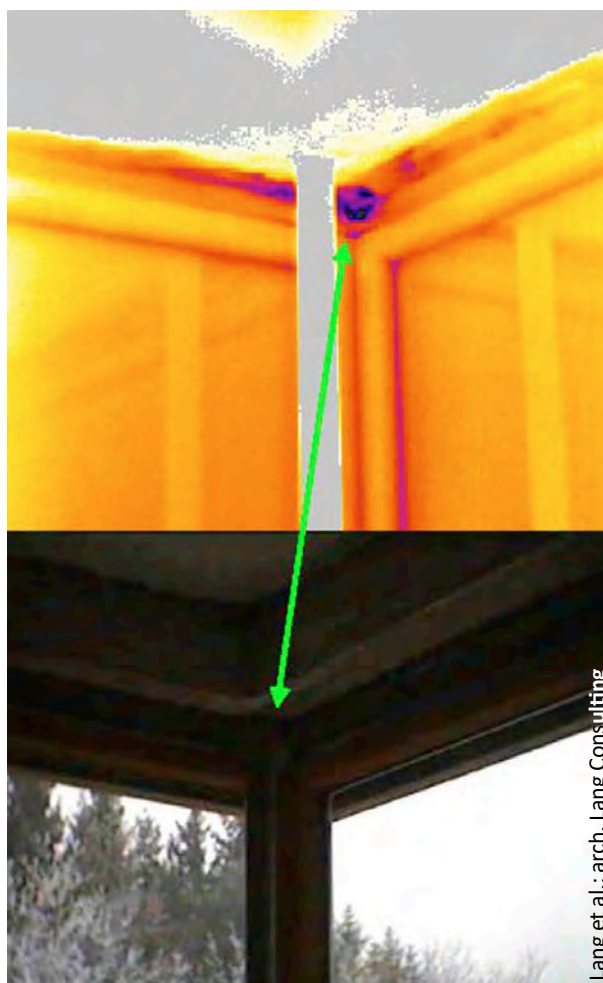
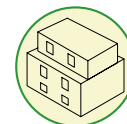


Fig. 94 Étude par imagerie thermique à *Pettenbach*, montrant ce qui ressemble à un pont thermique consécutif à la pose défectueuse d'une bande d'étanchéité au vent [62].

6.3 MONITORING

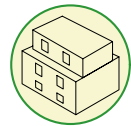
TÂCHE

- Vérifier la qualité du processus de rénovation grâce à un monitoring adéquat.

Le terme 'monitoring' désigne l'ensemble des méthodes visant à mesurer la performance du bâtiment au cours d'un certain laps de temps. Cette phase est très utile pour évaluer la qualité de la rénovation, vérifier la performance énergétique et identifier d'éventuels problèmes qui n'ont pas pu être détectés par des méthodes directes.

Dans sa forme la plus simple, le processus de monitoring peut consister à contrôler la consommation énergétique du bâtiment (pour le chauffage et/ou l'eau chaude sanitaire). Des approches plus complexes exigent d'installer divers types de capteurs, non seulement dans les locaux, mais aussi à l'intérieur des éléments de l'enveloppe. Une interface d'utilisateur spécifique peut également être utilisée pour faciliter l'accès aux données relevées (figure 95, p. 99) et permettre à terme un contrôle 'intelligent' de l'environnement intérieur.

Par ailleurs, les résultats des campagnes de mesures pourront être mis à profit pour valider des simulations numériques. Des collaborations seront ainsi envisagées avec des centres de



Arch. m3 Architects; Jaakko Kallio-Koski

Fig. 95 Captures d'écran d'une interface en ligne utilisée à Oulu pour accéder aux données de surveillance [66].

recherche et des universités afin que ces informations puissent bénéficier à leurs équipes, mais aussi au propriétaire du bâtiment. Lors de l'analyse des bases de données de surveillance d'un immeuble habité, il est essentiel de ne pas oublier que les activités des occupants et leur interaction avec l'équipement contrôlé (ouverture des fenêtres, changement des valeurs du thermostat, etc.) peuvent avoir un impact significatif sur les résultats obtenus.

Le tableau 22 (p. 100) présente quelques paramètres pouvant être surveillés pour évaluer la performance énergétique et le confort intérieur d'un bâtiment rénové, calibrer et valider des modèles ou régler les équipements techniques.

Ainsi, par exemple, les projets de rénovation d'Oulu et de Roosendaal menés dans le cadre de la recherche E2Rebuild ont fait l'objet d'une vaste campagne de monitoring.

6.4 MESURES PRÉVENTIVES ET CORRECTIVES

TÂCHES

- Garantir la bonne utilisation du bâtiment.
- Apporter des modifications au bâtiment ou à ses systèmes pour atteindre la performance désirée.

Une première série de mesures effectuées directement après les opérations de rénovation est d'ordre préventif : il s'agit de veiller à ce que les occupants disposent des connaissances

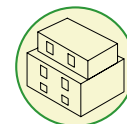


Tableau 22 Paramètres énergétiques et hygrothermiques pouvant être contrôlés après la rénovation AIM-ES.

Paramètres contrôlés	Utilisation
Factures énergétiques	Évaluation de l'efficacité énergétique / Validation de modèles
Consommation d'énergie pour le chauffage des locaux	
Consommation d'énergie pour l'eau chaude sanitaire	
Consommation d'électricité	
Valeur U	Évaluation de l'efficacité énergétique / Input de modèles
Température intérieure	Évaluation du confort / Réglage des systèmes
Humidité intérieure	
Vitesse de l'air intérieur	
Débits de ventilation	Évaluation du confort / Évaluation de l'efficacité énergétique / Input de modèles / Réglage des systèmes
Température extérieure	Input de modèles / Évaluation de l'efficacité énergétique
Humidité extérieure	Input de modèles
Vent extérieur (vitesse, direction)	
Rayonnement solaire	

requis à propos des modifications apportées au bâtiment. Une **mauvaise compréhension des nouveaux systèmes** (par exemple, de leur fonctionnement, du niveau de contrôle par l'utilisateur ou de l'environnement intérieur à viser) peut en effet donner lieu à des **écarts entre les performances prévues et les performances réelles**. Pour toutes ces raisons, il convient de prévoir des modes de communication et d'interaction adéquats avec les occupants après la rénovation. Cette communication peut prendre différentes formes, selon les besoins exprimés ou les problèmes observés : réunions, enquêtes, manuels, posters, etc.

Si les mesures préventives n'ont pas porté leurs fruits et/ou si la performance prévue n'est pas garantie, il est nécessaire de prendre des mesures **correctives**. Il peut s'agir entre autres :

- d'une intervention directe sur l'enveloppe pour réparer un défaut ou améliorer certains détails
- d'une modification de la stratégie de fonctionnement des équipements techniques du bâtiment ou de la manière de les commander (mise en place d'un contrôle intelligent, par exemple).

ANNEXE : ÉTUDES DE CAS

Cette Annexe décrit les études de cas auxquelles il est fait référence tout au long de ce document. Elle présente, pour chaque cas, des coupes transversales du module préfabriqué utilisé, tout en précisant :

- l'épaisseur des différentes couches
- leur rôle et leur type
- le type d'assemblage (sur chantier ou en usine).

Panneau ou revêtement à base de bois	Panneau, revêtement ou enduit à base de matériaux d'origine minérale	Lame d'air	Matériau isolant	Couche technique	Vitrage
--------------------------------------	----------------------------------------------------------------------	------------	------------------	------------------	---------

Fig. 96 Code couleurs utilisé dans les coupes transversales pour identifier les différents types de matériaux entrant dans la composition d'un module.

LISTE DES CAS ÉTUDIÉS

- Augsburg (DE)
- Berlin (DE)
- Graz (AT)
- Kapfenberg (AT)
- Londres (UK)
- Oulu (FIN)
- Pettenbach (AT)
- Riihimäki (FIN)
- Roosendaal (NL)
- Zurich (CH)

AUGSBURG (DE)

INFORMATIONS GÉNÉRALES		
Adresse	Grüntensstraße, Augsburg, Allemagne	
Projets de recherche associés	E2Rebuild – TES	
Année de construction	1966	
Type de bâtiment	Grand immeuble à appartements (6 niveaux)	
Murs existants	Massifs (maçonnerie de briques de 360 mm)	
Surface de façade	2900 m ²	
PROJET DE RÉNOVATION		
Architecte	Frank Lattke	
Étude géométrique approfondie	Drone avec photogrammétrie	
Extension du volume	Intégration de balcons existants comme jardin d'hiver (+ 182 m ²) Nouveaux balcons dans le plan des anciens	
Surface de plancher avant/après	–	–
Valeur U des murs extérieurs avant/après	1,6 W/m ² K	0,12 W/m ² K
Demande de chauffage avant/après	145 kWh/m ² an	33 kWh/m ² an
Occupation pendant la rénovation	Non	
Durée d'installation de la façade	8 semaines	
Équipement de montage	Échafaudage – Grue de chantier	
MODULES DE FAÇADE		
Type	TES fermé	
Orientation	Horizontale	
Dimensions types	Grandes (10 x 2,8 m)	
Poids type	3 tonnes pour 1 module	
Type de couche d'adaptation	Sous-structure (hor.) + 60 mm de cellulose insufflée	
Configuration des modules	Montage sur pied (voir § 4.6.3, p. 74)	
Transfert de charges à la base du bâtiment	Nouvelle fondation	
Équipements (techniques) intégrés	Nouvelles fenêtres (triple vitrage, U _w = 0,98 W/m ² K) Stores derrière le parement des modules	

28 mm	Revêtement	Bardage d'épicéa 140/28
30 mm	Lame d'air + lattes	Lattes en bois 30/50 mm
–	Pare-vent et pare-pluie	
15 mm	Panneau avant	Plaque de plâtre
200 mm	Structure en bois + isolation	Ossature en bois (KVH® 60/200 mm) + cellulose insufflée
10 mm	Panneau arrière	OSB
60 mm	Couche d'adaptation	Cellulose insufflée + sous-structure
Mur existant		

BERLIN (DE)

INFORMATIONS GÉNÉRALES		
Adresse	Burgmeisterstraße, Berlin, Allemagne	
Projets de recherche associés	–	
Année de construction	Années 1960	
Type de bâtiment	Grand immeuble à appartements (7 niveaux)	
Murs existants	Massifs	
Surface de façade	–	
PROJET DE RÉNOVATION		
Architecte	Schaller & Sternagel – Hildebrandt.lay.architekten – Green X Architekten	
Étude géométrique approfondie	Non	
Extension du volume	Intégration de balcons	
Surface de plancher avant/après	–	–
Valeur U des murs extérieurs avant/après	–	0,15 W/m ² K
Demande de chauffage avant/après	–	< 15 kWh/m ² an
Occupation pendant la rénovation	Non	
Équipement de montage	Plateforme de levage – Grue mobile	
MODULES DE FAÇADE		
Type	TES ouvert	
Orientation	Verticale	
Dimensions types	Grandes (dimension maximale : 12 m)	
Type de couche d'adaptation	Isolation insufflée (isolation principale)	
Configuration des modules	Montage distribué (voir § 4.6.3, p. 74)	
Équipements (techniques) intégrés	Nouvelles fenêtres (quadruple vitrage, U _w = 0,65 W/m ² K) Stores aux fenêtres Conduits + câbles (réseau et électricité) dans la lame d'air derrière le revêtement	

10 mm	Revêtement	Panneaux HPL
80 mm	Lame d'air + lattes	
–	Pare-vent et pare-pluie	
15 mm	Panneau avant	Plaque de plâtre
280 mm	Structure en bois + isolation	Ossature en bois + cellulose insufflée
40 mm	Couche d'adaptation	Cellulose insufflée + scellement latéral (bande de compression)
Mur existant		

GRAZ (AT)

INFORMATIONS GÉNÉRALES		
Adresse	Dieselweg, Graz, Autriche	
Projets de recherche associés	IEA Annex 50 – SQUARE	
Année de construction	1959	
Type de bâtiment	Grand immeuble à appartements (4 niveaux)	
Murs existants	Massifs	
PROJET DE RÉNOVATION		
Architecte	Architekturbüro Hohensinn ZT GmbH	
Étude géométrique approfondie	–	
Extension du volume	Intégration de balcons	
Surface de plancher avant/après	1091 m ²	1589 m ²
Valeur U des murs extérieurs avant/après	–	~ 0,18 W/m ² K
Demande de chauffage avant/après	184 kWh/m ² an	9,6 kWh/m ² an
Occupation pendant la rénovation	Non	
Équipement de montage	Plateforme de levage – Grue mobile	
MODULES DE FAÇADE		
Type	TES fermé	
Orientation	Horizontale	
Dimensions types	Grandes	
Type de couche d'adaptation	Sous-structure (vert.) + 100 mm de laine minérale	
Configuration des modules	Montage articulé (voir § 4.6.3, p. 74)	
Transfert de charges à la base du bâtiment	Profilé en L	
Équipements (techniques) intégrés	Nouvelles fenêtres Intégrés au TES : groupes de ventilation décentralisés avec récupération de chaleur Concept TES : panneaux solaires passifs en façade	

6 mm	Verre de sécurité	
29 mm	Lame d'air + lattes	
30 mm	Structure alvéolée	Panneau de carton alvéolé
19 mm	Panneau avant n° 1	Panneau de fibres de bois
16 mm	Panneau avant n° 2	OSB
120 mm	Structure en bois + isolation	Ossature en bois + laine minérale
19 mm	Panneau arrière	OSB
60 mm	Couche d'adaptation	Laine minérale + sous-structure
Mur existant		

KAPFENBERG (AT)

INFORMATIONS GÉNÉRALES		
Adresse	Johann-Böhm-straße, Kapfenberg, Autriche	
Projet de recherche associé	Haus der Zukunft (AT)	
Année de construction	1960-1961	
Type de bâtiment	Grand immeuble à appartements (4 niveaux + grenier)	
Murs existants	Éléments sandwichs préfabriqués	
Surface de façade	1622 m ²	
PROJET DE RÉNOVATION		
Architecte	Nussmüller Architekten ZT GmbH	
Étude géométrique approfondie	–	
Extension du volume	Enlèvement des anciens balcons Intégration de nouveaux balcons	
Surface de plancher avant/après	2756 m ² (surface chauffée)	–
Valeur U des murs extérieurs avant/après	0,87 W/m ² K	0,17 W/m ² K
Demande de chauffage avant/après	–	15 kWh/m ² an
Occupation pendant la rénovation	Oui	
Équipement de montage	–	
MODULES DE FAÇADE		
Type	TES ouvert avec membrane arrière (hybride)	
Orientation	Verticale	
Dimensions types	Grandes	
Type de couche d'adaptation	Sous-structure (vert.)	
Configuration des modules	Montage sur pied (voir § 4.6.3, p. 74)	
Transfert de charges à la base du bâtiment	Nouvelle fondation	
Équipements (techniques) intégrés	Nouvelles fenêtres (triple vitrage, $U_w = 0,9 \text{ W/m}^2\text{K}$) Concept TES : panneaux photovoltaïques et panneaux solaires passifs en façade	

24 mm	Revêtement	Panneau de fibrociment
50 mm	Lame d'air + lattes	
59 mm	Panneau avant	Panneau de fibres (MDF)
200 mm	Structure en bois + isolation	Ossature en bois massif + laine minérale insufflée
105 mm	Couche d'adaptation	Laine minérale insufflée + sous-structure
–	Pare-vapeur	
	Mur existant	

LONDRES (UK)

INFORMATIONS GÉNÉRALES		
Adresse	Parkview hub, Thamesmead, Londres, Royaume-Uni	
Projet de recherche associé	E2Rebuild	
Année de construction	Années 1960	
Type de bâtiment	Maisons en rangée (5 niveaux)	
Murs existants	Béton préfabriqué (isolation : 5 cm)	
Surface de façade	–	
PROJET DE RÉNOVATION		
Architecte	Sustainable by Design	
Étude géométrique approfondie	–	
Extension du volume	Intégration de balcons Nouveau grenier Nouveau couloir extérieur Nouvelles terrasses	
Surface de plancher avant/après	–	–
Valeur U des murs extérieurs avant/après	1,67 W/m ² K	0,12 W/m ² K
Demande de chauffage avant/après	186 kWh/m ² an	< 20 kWh/m ² an
Occupation pendant la rénovation	Oui	
Équipement de montage	Grue – Échafaudage	
MODULES DE FAÇADE		
Type	TES fermé	
Orientation	Horizontale	
Dimensions types	Grandes	
Type de couche d'adaptation	Sous-structure (hor.) + couche de compression (60 mm de laine minérale)	
Configuration des modules	Montage articulé (voir § 4.6.3, p. 74)	
Transfert de charges à la base du bâtiment	Béton cellulaire sur profilé en L	
Équipements (techniques) intégrés	Nouvelles fenêtres Ventilation : entrées et sorties d'air préinstallées en usine	

~ 20 mm	Revêtement	Bardage en bois massif
30 mm	Lame d'air + lattes	
–	Pare-vent et pare-pluie	
15 mm	Panneau avant	Plaque de plâtre
280 mm	Structure en bois + isolation	Ossature en bois + cellulose insufflée
15 mm	Panneau arrière	OSB
68 mm	Couche d'adaptation	Cellulose insufflée + sous-structure
Mur existant		

OULU (FIN)

INFORMATIONS GÉNÉRALES		
Adresse	Virkakatu, Oulu, Finlande	
Projets de recherche associés	E2Rebuild – TES	
Année de construction	1984	
Type de bâtiment	Petit immeuble à appartements (2 niveaux)	
Murs existants	Éléments sandwichs préfabriqués	
Surface de façade	480 m ²	
PROJET DE RÉNOVATION		
Architecte	m3 Architects	
Étude géométrique approfondie	–	
Extension du volume	Nouveaux balcons Extension de l'avant-toit	
Surface de plancher avant/après	–	–
Valeur U des murs extérieurs avant/après	0,28 W/m ² K	0,12 W/m ² K
Demande de chauffage avant/après	148 kWh/m ² an	26 kWh/m ² an
Occupation pendant la rénovation	Non	
Équipement de montage	Plateforme de levage – Grue mobile	
MODULES DE FAÇADE		
Type	TES fermé	
Orientation	Horizontale	
Dimensions types	Grandes (~ 10 x 3,5 m)	
Type de couche d'adaptation	Couche de compression (50 mm de laine minérale)	
Configuration des modules	Montage articulé (voir § 4.6.3, p. 74)	
Transfert de charges à la base du bâtiment	Nouvelle fondation	
Équipements (techniques) intégrés	Nouvelles fenêtres ($U_w = 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$)	

7 mm	Revêtement	Plaque de fibrociment
44 mm	Lame d'air + lattes	
9 mm	Panneau avant	Plaque de plâtre
48 mm	Structure en bois + isolation	Ossature en bois horizontale + laine minérale
198 mm	Structure en bois	Ossature en bois verticale + laine minérale
9 mm	Panneau arrière	Contreplaqué
50 mm	Couche d'adaptation	Laine minérale
Mur existant (couche extérieure enlevée)		

PETTENBACH (AT)

INFORMATIONS GÉNÉRALES		
Adresse	Pettenbach, Autriche	
Projet de recherche associé	Haus der Zukunft (AT)	
Année de construction	1962	
Type de bâtiment	Maison unifamiliale (2 niveaux)	
Murs existants	Béton à base de copeaux de bois	
Surface de façade	–	
PROJET DE RÉNOVATION		
Architecte	Lang Consulting	
Étude géométrique approfondie	–	
Extension du volume	Étage supplémentaire Extension horizontale	
Surface de plancher avant/après	97 m ²	217 m ²
Valeur U des murs extérieurs avant/après	1,0 W/m ² K	0,11 W/m ² K
Demande de chauffage avant/après	280 kWh/m ² an	15 kWh/m ² an
Occupation pendant la rénovation	Non	
Équipement de montage	Grue mobile	
MODULES DE FAÇADE		
Type	TES ouvert	
Orientation	Horizontale	
Dimensions types	Grandes	
Type de couche d'adaptation	Isolation insufflée (isolation principale)	
Configuration des modules	Montage distribué (voir § 4.6.3, p. 74) Portée d'un étage	
Équipements (techniques) intégrés	Nouvelles fenêtres (triple vitrage) Stores Concept TES : panneaux photovoltaïques sur modules de façade	

30 mm	Revêtement	Bardage en bois ajouré
45 mm	Lame d'air + lattes	
–	Pare-vent et pare-pluie	
16 mm	Panneau avant	Panneau de fibres de bois (MDF)
355 mm	Structure en bois + isolation	Ossature en bois + cellulose insufflée
~ 50 mm	Couche d'adaptation	Cellulose insufflée + scellement latéral en laine minérale
Mur existant (couche extérieure enlevée)		

RIIHIMÄKI (FIN)

INFORMATIONS GÉNÉRALES		
Adresse	Saturnuksenkatu, Riihimäki, Finlande	
Projets de recherche associés	TES – Innova (FIN)	
Année de construction	1975	
Type de bâtiment	Grand immeuble à appartements (4 niveaux)	
Murs existants	Éléments sandwichs préfabriqués	
Surface de façade	–	
PROJET DE RÉNOVATION		
Architecte	Kimmo Lylykangas	
Étude géométrique approfondie	Scanning au laser	
Extension du volume	Nouveaux balcons (armatures en acier) Nouveaux espaces techniques sur le toit	
Surface de plancher avant/après	–	–
Valeur U des murs extérieurs avant/après	0,25 W/m ² K	0,1 W/m ² K
Demande de chauffage avant/après	92,8 kWh/m ² an	< 25 kWh/m ² an
Occupation pendant la rénovation	Oui	
Équipement de montage	Grue	
MODULES DE FAÇADE		
Type	TES fermé	
Orientation	Verticale	
Dimensions types	Grandes (dimension maximale : 12 m)	
Type de couche d'adaptation	Sous-structure (hor.) + 70 mm de laine minérale	
Configuration des modules	Montage sur pied (voir § 4.6.3, p. 74)	
Transfert de charges à la base du bâtiment	Extension de la fondation existante	
Équipements (techniques) intégrés	Nouvelles fenêtres (quadruple vitrage, $U_w = 0,66$ W/m ² K) Portes de balcons Raccordés au TES : conduits de ventilation provenant du système centralisé à l'intérieur des modules	

10 mm	Revêtement	Enduit
50 mm	Isolation	Laine minérale
~ 20 mm	Panneau avant	Fibrociment
300 mm	Structure en bois + isolation	Ossature lamellée-collée + laine minérale
9 mm	Panneau arrière	Contreplaqué
70 mm	Couche d'adaptation	Laine minérale + sous-structure
Mur existant (couche extérieure enlevée)		

ROOSENDAAL (NL)

INFORMATIONS GÉNÉRALES		
Adresse	Roosendaal, Pays-Bas	
Projets de recherche associés	IEA Annex 50 – E2Rebuild	
Année de construction	1958-66	
Types de bâtiments	Maisons en rangée (2 niveaux + grenier)	
Murs existants	Murs creux	
Surface de façade	–	
PROJET DE RÉNOVATION		
Architecte	VDM Woningen	
Étude géométrique approfondie	Non	
Extension du volume	Non	
Surface de plancher avant/après	120 m ² (surface chauffée par maison)	120 m ² (surface chauffée par maison)
Valeur U des murs extérieurs avant/après	0,8 W/m ² K	0,09 W/m ² K
Demande de chauffage avant/après	95 kWh/m ² an	22 kWh/m ² an
Occupation pendant la rénovation	Oui	
Durée d'installation de la façade	5 jours par maison	
Équipement de montage	Grue mobile – Échafaudage	
MODULES DE FAÇADE		
Type	TES fermé	
Orientation	Verticale	
Dimensions types	Moyennes (dimension maximale : ~ 6 m)	
Type de couche d'adaptation	Creux rendu étanche autour des châssis de fenêtres	
Configuration des modules	Montage sur pied (voir § 4.6.3, p. 74)	
Transfert de charges à la base du bâtiment	Extension de la fondation existante	
Équipements (techniques) intégrés	Nouvelles fenêtres (triple vitrage)	

~ 10 mm	Revêtement	Ardoises naturelles
40 mm	Lame d'air + lattes (structure croisée)	
16 mm	Panneau avant	Panneau de fibres de bois
350 mm	Structure en bois + isolation	Ossature constituée de poutres en I + cellulose insufflée
15 mm	Panneau arrière	OSB
Mur existant (couche extérieure enlevée)		

ZURICH (CH)

INFORMATIONS GÉNÉRALES		
Adresse	Segantinistrasse, Zurich, Suisse	
Projets de recherche associés	IEA Task 37 – IEA Annex 50	
Année de construction	1954	
Type de bâtiment	Petit immeuble à appartements (3 niveaux + grenier)	
Murs existants	Massifs (maçonnerie de briques de 320 mm)	
Surface de façade	–	
PROJET DE RÉNOVATION		
Architecte	Kämpfen für Architektur	
Étude géométrique approfondie	Scanning au laser	
Extension du volume	Étage supplémentaire Extensions horizontales Nouveaux balcons	
Surface de plancher avant/après	458 m ² (surface chauffée)	657 m ² (surface chauffée)
Valeur U des murs extérieurs avant/après	1,07 W/m ² K	0,18 W/m ² K
Demande de chauffage + ECS avant/après	175 kWh/m ² an	17,2 kWh/m ² an
Occupation pendant la rénovation	Non	
Équipement de montage	Grue – Échafaudage	
MODULES DE FAÇADE		
Type	TES ouvert	
Orientation	Horizontale	
Dimensions types	Grandes (dimension maximale : 10 m)	
Type de couche d'adaptation	Isolation insufflée (isolation principale)	
Configuration des modules	Montage sur pied (voir § 4.6.3, p. 74)	
Transfert de charges à la base du bâtiment	Poutre en bois sur consoles	
Équipements (techniques) intégrés	Nouvelles fenêtres ($U_w = 0,8$ W/m ² K) Stores Raccordés au TES : conduits de ventilation	

10 mm	Revêtement	Enduit
40 mm	Isolant	Panneau de fibres de bois
~ 20 mm	Panneau avant	Panneau de fibrociment
180 mm	Structure en bois + isolation	Ossature en bois + cellulose insufflée
20-50 mm	Couche d'adaptation	Cellulose insufflée + scellement latéral en laine minérale
Mur existant (couche extérieure enlevée)		

BIBLIOGRAPHIE

Brewer J. et Kieft H.

1. Bewonerscommunicatie bij duurzame woningverbetering: Practical Manual For Project Leaders And Their Fellow Players. Boxtel : Aenas, 2010.

Bureau de normalisation (Bruxelles, www.nbn.be)

2. NBN B 62-002 Performances thermiques de bâtiments. Calcul des coefficients de transmission thermique (valeurs U) des composants et éléments de bâtiments. Calcul des coefficients de transfert de chaleur par transmission (valeur HT) et par ventilation (valeur Hv). Novembre 2008.
3. NBN EN 438-7 Stratifiés décoratifs haute pression (HPL). Plaques à base de résines thermodurcissables (communément appelées stratifiés). Partie 7 : panneaux stratifiés compacts et composites HPL pour finitions des murs et plafonds intérieurs et extérieurs. Mai 2006.
4. NBN EN 492 Ardoises en fibres-ciment et leurs accessoires en fibres-ciment. Spécification du produit et méthodes d'essai. Mai 2018.
5. NBN EN 634-1 Panneaux de particules liées au ciment. Exigences. Partie 1 : exigences générales. Octobre 1995.
6. NBN EN 771-1+A1:2015 Spécification pour éléments de maçonnerie. Partie 1 : briques de terre cuite. Octobre 2015.
7. NBN EN 1363-1 Essais de résistance au feu. Partie 1 : exigences générales. Septembre 2012.
8. NBN EN 1990 ANB Eurocode 0 Bases de calcul des structures. Annexe nationale. Janvier 2013.
9. NBN EN 1991-1-1:2002 Eurocode 1 Actions sur les structures. Partie 1-1 : Actions générales. Poids volumiques, poids propres, charges d'exploitation bâtiments (+ AC:2009).
10. NBN EN 1992-4:2018 Eurocode 2 Calcul des structures en béton. Partie 4 : conception et calcul des éléments de fixation pour béton.
11. NBN EN 12467:2012+A2:2018 Plaques planes en fibres-ciment. Spécifications du produit et méthodes d'essai. Mai 2018.
12. NBN EN 12845 Installations fixes de lutte contre l'incendie. Systèmes d'extinction automatique du type sprinkleur. Conception, installation et maintenance. Juillet 2015.
13. NBN EN 12975-1+A1 Installations solaires thermiques et leurs composants. Capteurs solaires. Partie 1 : exigences générales. Décembre 2010.
14. NBN EN 12976-1 Installations solaires thermiques et leurs composants. Installations préfabriquées en usine. Partie 1 : exigences générales. Février 2017.
15. NBN EN 12977-1 Installations solaires thermiques et leurs composants. Installations assemblées à façon. Partie 1 : exigences générales pour chauffe-eau solaires et installations solaires combinées. Avril 2018.
16. NBN EN 13245-2 Plastiques. Profilés en poly(chlorure de vinyle) non plastifié (PVC-U) pour applications dans le bâtiment. Partie 2 : profilés en PVC-U et profilés en PVC-UE pour finitions des murs et plafonds intérieurs et extérieurs (+ AC:2009). Novembre 2008.
17. NBN EN 13499 Produits isolants thermiques pour bâtiments. Systèmes composites d'isolation thermique par l'extérieur à base de polystyrène expansé (ETICS). Spécification. Octobre 2003.

18. NBN EN 13501-1+A1 Classement au feu des produits et éléments de construction. Partie 1 : classement à partir des données d'essais de réaction au feu. Janvier 2010.
19. NBN EN 13914-1 Conception, préparation et application des enduits extérieurs et intérieurs. Partie 1 : enduits extérieurs. Mars 2016.
20. NBN EN 14782 Plaques métalliques autoportantes pour couverture, bardages extérieur et intérieur et cloisons. Spécification de produit et exigences. Mars 2006.
21. NBN EN 14783 Tôles et bandes métalliques totalement supportées pour couverture, bardages extérieur et intérieur. Spécification de produit et exigences. Juillet 2013.
22. NBN EN 14915+A1:2017 Lambris et bardages en bois. Caractéristiques, exigences et marquage. Juillet 2017.
23. NBN EN ISO 717-1 Acoustique. Évaluation de l'isolement acoustique des immeubles et des éléments de construction. Partie 1 : isolement aux bruits aériens (ISO 717-1:1996). Mai 2013.
24. NBN EN ISO 717-2 Acoustique. Évaluation de l'isolement acoustique des immeubles et des éléments de construction. Partie 2 : protection contre le bruit de choc (ISO 717-2:1996). Mai 2013.
25. NBN EN ISO 9972 Performance thermique des bâtiments. Détermination de la perméabilité à l'air des bâtiments. Méthode de pressurisation par ventilateur (ISO 9972:2015). Octobre 2015.
26. NBN EN ISO 10545-12 Carreaux et dalles céramiques. Partie 12 : détermination de la résistance au gel (ISO 10545-12:1995, Rectificatif technique 1:1997 inclus). Septembre 1997.
27. NBN EN ISO 12354-1 Acoustique du bâtiment. Calcul de la performance acoustique des bâtiments à partir de la performance des éléments. Partie 1 : isolement acoustique aux bruits aériens entre des locaux (ISO 12354-1:2017). Septembre 2017.
28. NBN EN ISO 12354-2 Acoustique du bâtiment. Calcul de la performance acoustique des bâtiments à partir de la performance des éléments. Partie 2 : isolement acoustique au bruit de choc entre des locaux (ISO 12354-2:2017). Septembre 2017.
29. NBN EN ISO 12354-3 Acoustique du bâtiment. Calcul de la performance acoustique des bâtiments à partir de la performance des éléments. Partie 3 : isolement aux bruits aériens venus de l'extérieur (ISO 12354-3:2017). Septembre 2017.
30. NBN EN ISO 52000-1 Performance énergétique des bâtiments. Évaluation cadre PEB. Partie 1 : cadre général et modes opératoires (ISO 52000-1:2017).
31. NBN S 01-400-1 Critères acoustiques pour les immeubles d'habitation. Janvier 2008.
32. NBN S 01-401 Acoustique. Valeurs limites des niveaux de bruit en vue d'éviter l'inconfort dans les bâtiments. Novembre 1987.
33. NBN S 23-002 Vitrierie. Avril 2007.

Centre scientifique et technique de la construction (Bruxelles, www.cstc.be)

34. [Le lean construction](#). Les Dossiers du CSTC 2016/3.16.
35. NIT 146 [Les revêtements extérieurs verticaux en matériaux pierreux naturels de mince épaisseur](#) (partiellement remplacée par la NIT 228 en ce qui concerne les méthodes d'essais et les critères de résistance au gel). Note d'information technique, août 1983.
36. NIT 209 [Les enduits extérieurs](#) (partiellement remplacée par la NIT 257). Note d'information technique, septembre 1998.
37. NIT 214 [Le verre et les produits verriers. Les fonctions des vitrages](#). Note d'information technique, décembre 1999.
38. NIT 221 [La pose des vitrages en feuillure](#). Note d'information technique, septembre 2001.
39. NIT 228 [Pierres naturelles](#). Note d'information technique, juin 2006.
40. NIT 243 [Les revêtements de façade en bois et en panneaux à base de bois](#). Note d'information technique, novembre 2011.

41. NIT 246 [Postisolation des murs creux par remplissage de la coulisse](#). Note d'information technique, juin 2012.
42. NIT 252 [L'humidité dans les constructions. Particularités de l'humidité ascensionnelle](#). Note d'information technique, décembre 2014.
43. NIT 255 [L'étanchéité à l'air des bâtiments](#). Note d'information technique, novembre 2015.
44. NIT 257 [Enduits sur isolation extérieure \(ETICS\)](#). Note d'information technique, août 2016.

[Commission électrotechnique internationale \(Genève, <https://www.iec.ch>\)](#)

45. CEI 61215 Modules photovoltaïques (PV) au silicium cristallin pour application terrestre. Qualification de la conception et homologation (2005).

[Cronhjort Y., Riikonen V., Kolehmainen M., Nordberg K. et Huss](#)

46. SmartTES. Book 2: TES Extension. Woodwisdom Net, 2014.

[Dubois S., Vanhellefont Y. et de Bouw M.](#)

47. [Le relevé 3D à l'heure du BIM. Capturer la réalité en haute définition](#). Bruxelles, Centre scientifique et technique de la construction, Monographie n° 29, octobre 2018.

[Geier S., Ehrbar D. et Schwehr P.](#)

48. Evaluation of Collaboration Models (D3.1). E2Rebuild, 2012.

[Geving S. et Päätaalo J.](#)

49. SmartTES - Book 4: Building Physics. Woodwisdom Net, 2014.

[Grischott N., Kämpfen B. et Naef R.](#)

50. An innovative prefabricated retrofit system for low energy renovations. Case study : apartment building. Berne, Confédération Suisse, 2011.

[Gumpp A., Hernández Maetschl S. et Schlehle M.](#)

51. [The Potential of Standardized Envelope Concepts for Retrofitting](#). Potentiale von standardisierten Fassaden-sanierungskonzepten. Le potentiel spécifique des concepts de rénovation de façade standardisés. 21. Internationales Holzbau-Forum IHF 2015.

[Guttmann E. et Höfler K.](#)

52. [Wohnhausanlage Johann-Böhm-Strasse, Kapfenberg/A](#). Thermische Hülle.

[Herkerl S. et Kagerer F.](#)

53. [Advances in housing retrofit. Processes, concepts and technologies](#). IEA Solar Heating and Cooling Program, février 2011.

[Huybrechts N. et Van Lysebetten G.](#)

54. [Le rempiètement de fondations existantes](#). Bruxelles, Centre scientifique et technique de la construction, Infofiche n° 72.1, 2015.
55. [La reprise en sous-œuvre au moyen de fouilles blindées](#). Bruxelles, Centre scientifique et technique de la construction, Infofiche n° 72.2, 2015.

[Kimmo Lylykangas](#)

56. [TES-Menetelmä Passiivisaneeraus Puurunkoisilla Julkisivuelementeillä](#). Puurakentamisen RoadShow 2012.

Kimmo Lylykangas

57. The role of architectural design in the rise of energy efficient buildings. Oulou (FIN), International SBHN Conference, 2014.

Kints C.

58. La rénovation énergétique et durable des logements wallons : analyse du bâti existant et mise en évidence des typologies des logements prioritaires. Louvain-la-Neuve, UCL, Architecture et Climat, IEA SHC Task 37, septembre 2008.

Knoops I. et Caluwaerts F.

59. [Pose de bardages réalisés dans des matériaux autres que le bois](#). Bruxelles, Centre scientifique et technique de la construction, Les Dossiers du CSTC 2014/4.8.

Kobler R. et al.

60. IEA ECBCS Annex 50: Retrofit module design guide. IEA ECBCS, 2011.

Kulmer - GAP Solution

61. Kulmer Holzbau. Innovativ Effizient Nachhaltig.

Lang G., Lang M., Krauß B., Panic E., Obermayr H.C. et Wimmer R.

62. [Erstes Einfamilien-Passivhaus im Altbau. Umsetzung des Passivhausstandards und -komforts in der Altbausanierung von Einfamilienhäusern am Beispiel EFH Pettenbach](#). Wien, Berichte aus Energie- und Umweltforschung n° 38, 2007.

Larsson S.

63. [Weight and dimensions of heavy commercial vehicles as established by Directive 96/53/EC and the European Modular System \(EMS\)](#). Bruxelles, Workshop on LHV, juin 2009. [Consulté le 5 octobre 2018]

Lattke F., Hernandez-Maetschel S., Geier S. et Walcher C.

64. Guidelines to off-site production / on-site assembly and logistics, D4.2 / D4.3, E2Rebuild, 2014.

Lattke F., Larsen K.E., Ott S. et Cronhjort Y.

65. TES EnergyFaçade – prefabricated timber based building system for improving the energy efficiency of the building envelope. Munich, Woodwisdom Net, Université technique de Munich, 2011.

Le Roux S.

66. E2Rebuild, D2.2 Demonstrator Oulu. EU Seventh Framework Programme, 2014.

67. E2Rebuild, T7.3 National Seminars: Finland. EU Seventh Framework Programme, 2014.

Loncour X., Tilmans A., Steskens P. et Roels S.

68. [Isolation des murs existants par l'intérieur : systèmes et dimensionnement](#). Bruxelles, Centre scientifique et technique de la construction, Les Dossiers du CSTC 2013/2.4.

Martin Y., Eeckhout S., Lassoie L. et al.

69. [Sécurité incendie des façades de bâtiments multiétagés](#). Bruxelles, Centre scientifique et technique de la construction, Monographie n° 23, 2017.

Organisation européenne d'agrément techniques (Bruxelles, www.eota.be)

- 70. ETAG 001 Chevilles métalliques pour béton. Guide d'agrément technique européen, 1997.
- 71. ETAG 004 Systèmes d'isolation thermique extérieure par enduit sur isolant. Guide d'agrément technique européen, 2001.
- 72. ETAG 014 Chevilles plastiques destinées à fixer les systèmes d'isolation thermique extérieure par enduit sur isolant. Guide d'agrément technique européen, 2002.
- 73. ETAG 017 Vecture kits. Prefabricated units for external wall insulation. Guide d'agrément technique européen, 2005.

Ott S., Hernandez-Maetschel S. et Lattke F.

- 74. E2Rebuild, D4.1 Guidelines to Preliminaries/Survey. EU Seventh Framework Programme, 2011.

Ott S., Loebus S., Time B., Homb A. et Botsch R.

- 75. SmartTES, Book 3: Multifunctional TES. Woodwisdom Net, 2014.

...

- 76. Passief renoveren. De Kroeven Roosendaal. Doelbewust op zoek naar de grenzen.

...

- 77. Principe de fonctionnement de la façade active Lucido®. Charpente Concept Büchi - Emery - Meylan - Villar, ingénieurs et designers du bois.

proHolz – Arbeitsgemeinschaft der österreichischen Holzwirtschaft

- 78. Wohnhausanlage Grüntenstrasse, Augsburg/D. Thermische Hülle mit Einbindung bestehender Balkone in die Gebäudehülle.

...

- 79. Sanierung Johann Boehmstrasse. Ennstal Bauen & Wohnen, Projektdokumentation, Februar 2012.

Schaller + Sternagel Architekten

- 80. Sanierung mit vorgefertigten Elementen im Holzbau. Praxisbericht Berlin – Tempelhof. Burgemeisterstrasse 21.

Schwehr P. et Fischer R.

- 81. Building typology and morphology of Swiss multi-family homes. IEA ECBCS Annex 50, 2010.

Schwehr P., Fischer R., Geier S. et Höfler K.

- 82. Retrofit Strategies Design Guide-Advanced Retrofit Strategies & 10 Steps to a Prefab Module. IEA Annex 50, 2011.

Service public fédéral Économie (Bruxelles, www.economie.fgov.be)

- 83. STS 34:03.6 Ardoises naturelles. Spécifications techniques unifiées, 2006.

Service public fédéral Intérieur (Bruxelles, <https://ibz.be/>)

- 84. Arrêté royal du 7 juillet 1994 fixant les normes de base en matière de prévention contre l'incendie et l'explosion, auxquelles les bâtiments nouveaux doivent satisfaire. Bruxelles, SPF Intérieur, Moniteur belge du 26 avril 1995 (+ erratum MB 19/3/1996) et ses modifications du 4/4/1996 (MB 20/4/1996), du 18/12/1996 (MB 31/12/1996), du 19/12/1997 (MB

30/12/1997), du 4/4/2003 (MB 5/5/2003), du 13/6/2007 (MB 18/7/2007) + erratum (MB 17/8/2007), du 18/9/2008 (MB 16/10/2008), du 1/3/2009 (MB 15/7/2009) + erratum (MB 4/2/2011) et du [12/7/2012 \(MB 21/9/2012\)](#) + erratum (MB 10/1/2014) et du 7/12/2016 (MB 18/01/2017).

Suain F.

85. [Gérer son chantier avec la méthode des 5S](#). Bruxelles, Centre scientifique et technique de la construction, Les Dossiers du CSTC 2018/2.15.

TABULA – EPISCOPE (<http://episcope.eu/welcome/>)

86. IEE Project EPISCOPE. Site web consulté le 11 mars 2015.

Tijskens A.

87. Ontwerp en detaillering van een prefab-gevelsysteem voor de thermische renovatie van een bestaand kantoorgebouw. Louvain, mémoire de master, Katholieke Universiteit Leuven, 2015.

Tilmans A. et Roels S.

88. [Isolation des murs existants par l'intérieur : diagnostic](#). Bruxelles, Centre scientifique et technique de la construction, Les Dossiers du CSTC 2012/4.16.

Université catholique de Louvain – Service public de Wallonie

89. [Energie plus : Le confort](#). Consulté le 10 juillet 2015.

van Reekum A.

90. Passieffhuis renovatie De Kroeven Roosendaal. Aramis-Alleewonen, Symposium, décembre 2013.

Van Holm M., Hilderson W., Vandeveldel B., Mlecnik E., Verbeke S. et Cré J.

91. Inventarisatie van doorgedreven energetische renovaties van woongebouwen. VITO, 2012.

Woodarchitecture.fi

92. [Appartements pour étudiants Virkakatu 8](#). Architects m3.

AUTRES RÉFÉRENCES UTILES

PROJETS DE RECHERCHE ET DOCUMENTS ASSOCIÉS

IEA ANNEX 50	
Période	2007-2011
Site Internet	https://nachhaltigwirtschaften.at/en/iea/technologyprogrammes/ebc/iea-ecbcs-annex-50.php (dernière visite : 11/07/2019)
Structure et partenaires impliqués	Projet européen mené dans le cadre du programme de recherche et de développement dans la construction de l'Agence internationale de l'énergie. Pays impliqués : Autriche, Belgique, France, Pays-Bas, Portugal, République tchèque, Suède et Suisse
Résumé	L'objectif était de démontrer un concept innovant de rénovation de l'ensemble du bâtiment sur la base d'un prototype de système d'enveloppe préfabriqué avec équipements techniques intégrés. Le projet était articulé autour des cinq zones de recherche suivantes : Définition et spécification du concept / Systèmes de toiture intégrés / Systèmes HVAC et solaires / Éléments de façade / Monitoring et diffusion.
Points clés	Bon point de départ pour comprendre le défi que représente une rénovation au moyen de systèmes AIM-ES. 4 systèmes étudiés Quelques bâtiments de démonstration surveillés.
Documents et outils	Un guide sur les stratégies de rénovation de bâtiments : solutions types pour la rénovation de bâtiments complets. Un guide sur la conception des modules de rénovation : directives pour l'évaluation du système, la conception, la construction et la garantie de qualité. Un rapport sur des études de cas. Un outil 'Retrofit Advisor'.
Études de cas	6 études de cas au total 3 cas sont repris dans ce document : Roosendaal , Graz , Zurich
TES ENERGYFACADE	
Période	2008-2010
Site Internet	http://www.tesenergyfacade.com/ (dernière visite : 06/06/2016)
Structure et partenaires impliqués	Projet de recherche européen créé par Woodwisdom.Net Pays impliqués : Allemagne, Finlande et Norvège
Résumé	Le 'TES EnergyFacade' est présenté comme un système de construction en éléments préfabriqués basé sur des modules à ossature en bois de grandes dimensions. Le résultat de ce projet est un manuel servant de base à l'optimisation de l'enveloppe du bâtiment par le biais de l'approche TES.
Points clés	Basé sur des éléments à base de bois de grandes dimensions. L'objectif consistait à développer une méthode de rénovation de façade. Le 'manuel TES' a servi de référence tout au long du présent document.
Document	Manuel présentant la méthode TES et abordant les aspects d'investigation, de conception, de construction et de garantie de qualité.
Études de cas	3 études de cas au total 1 cas est repris dans ce document : Augsburg
smartTES	
Période	2010-2013
Site Internet	http://www.tesenergyfacade.com/ (dernière visite : 06/06/2016)
Structure et partenaires impliqués	Projet de recherche européen créé par Woodwisdom.Net Pays impliqués : Allemagne, Autriche, Finlande et Norvège

Résumé	Le projet smartTES est un prolongement du projet de recherche TES EnergyFacade. Il est basé sur la méthode TES. Le principal objectif consiste à faire progresser la méthode de rénovation durable de bâtiments en matière d'efficacité énergétique grâce au développement d'une enveloppe de bâtiment multifonctionnelle. (texte adapté à partir de http://www.tesenergyfacade.com/)
Points clés	8 ensembles de tâches : TES multifonctionnel / Extensions au moyen de TES / Rénovation urbaine au moyen de TES / Accès au marché des TES / Durabilité des TES / Adaptation des bâtiments au climat + Coordination Projet de recherche de référence sur l'aspect 'multifonctionnel' des éléments AIM-ES
Documents	6 documents de référence : Innovation et marketing/ Extensions au moyen de TES / TES multifonctionnel / Physique du bâtiment / Sécurité incendie / Durabilité
E2REBUILD	
Période	2011-2014
Site Internet	https://smartcities-infosystem.eu/sites-projects/projects/e2rebuild (dernière visite : 11/07/2019)
Structure et partenaires impliqués	Projet européen (7 ^e programme-cadre) Pays impliqués : Allemagne, Autriche, Finlande, France, Pays-Bas, Royaume-Uni et Suède
Résumé	Ce projet avait pour but d'accélérer l'évolution vers une meilleure efficacité énergétique dans le secteur de la construction (1) par l'étude, la promotion et la démonstration de stratégies de rénovation modernes et efficaces sur le plan énergétique, (2) par la mise en œuvre et la démonstration de solutions de rénovation durables permettant de réduire la consommation d'énergie et (3) par la mise en place d'un processus industrialisé intégré visant à réduire au maximum les nuisances techniques et sociales pour les occupants.
Points clés	Études de cas très détaillées Projet de recherche de référence sur les modèles de collaboration et l'intégration du comportement des occupants dans la conception des systèmes AIM-ES.
Documents	4 directives : (1) pour contrôler les opérations nécessaires à la préfabrication de la façade; (2) pour la production en usine, l'assemblage sur chantier et la logistique; (3) à l'intention des utilisateurs finaux; (4) à l'intention des exploitants. Un document passant en revue différents modèles de collaboration entre acteurs de la construction à partir des études de cas.
Études de cas	7 études de cas au total 3 cas sont repris dans ce document : Augsburg , Londres , Oulu , Roosendaal

AUTRES PROJETS DE RECHERCHE INTÉRESSANTS

- Projet européen MEEFS : système de façade multifonctionnel efficace sur le plan énergétique pour la rénovation de bâtiments (<http://www.meefs-retrofitting.eu/>)
 - Toujours en cours
 - Développement, évaluation et démonstration d'un système de façade modulaire, multifonctionnel et innovant
- Projet européen SQUARE : système de garantie de la qualité pour la rénovation énergétique de bâtiments existants (<https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/en/projects/square>)
 - 2007-2010
 - Développement d'un système de garantie de qualité (QA) pour la rénovation et l'entretien, adapté aux conditions de plusieurs pays européens et mis en application dans des projets pilotes

AUTRES DOCUMENTS UTILES

- Haselsteiner E., plusFASSADEN - Internationaler Know-how- und Wissenstransfer über "intelligente Fassadensysteme" für österreichische AkteurInnen und KompetenzträgerInnen. Haus der Zukunft, 2011 (<http://www.hausderzukunft.at/results.html/id5944>)
- proHolz Autriche, Zuschnitt n° 50, 2013 (<http://www.proholz.at/zuschnitt/ausgabe/50/>)
- proHolz Autriche, Att.zuschnitt - Thermische Sanierung und Modernisierung von Bestandsgebäuden. 2013 (<http://www.proholz.at/shop/attzuschnittarbeitsheft/>)

Editeur responsable : Olivier Vandooren
CSTC, Rue du Lombard 42
1000 Bruxelles

Recherche • Développe • Informe

Principalement financé par les redevances de quelque 95.000 entreprises belges représentant la quasi-majorité des métiers de la construction, le CSTC incarne depuis plus de 55 ans le centre de référence en matière scientifique et technique, contribuant directement à l'amélioration de la qualité et de la productivité.

Recherche et innovation

L'introduction de techniques innovantes est vitale pour la survie d'une industrie. Orientées par les professionnels de la construction, entrepreneurs ou experts siégeant au sein des Comités techniques, les activités de recherche sont menées en parfaite symbiose avec les besoins quotidiens du secteur.

Avec l'aide de diverses instances officielles, le CSTC soutient l'innovation au sein des entreprises, en les conseillant dans des domaines en adéquation avec les enjeux actuels.

Développement, normalisation, certification et agréation

A la demande des acteurs publics ou privés, le CSTC réalise divers développements sous contrat. Collaborant activement aux travaux des instituts de normalisation, tant sur le plan national (NBN) qu'europpéen (CEN) ou international (ISO), ainsi qu'à ceux d'instances telles que l'Union belge pour l'agrément technique dans la construction (UBAtc), le Centre est idéalement placé pour identifier les besoins futurs des divers corps de métier et les y préparer au mieux.

Diffusion du savoir et soutien aux entreprises

Pour mettre le fruit de ses travaux au service de toutes les entreprises du secteur, le CSTC utilise largement l'outil électronique. Son site Internet adapté à la diversité des besoins des professionnels contient les ouvrages publiés par le Centre ainsi que plus de 1.000 normes relatives au secteur.

La formation et l'assistance technique personnalisée contribuent au devoir d'information. Aux côtés de quelque 750 sessions de cours et conférences thématiques impliquant les ingénieurs du CSTC, plus de 18.000 avis sont émis chaque année par la division Avis techniques.

SIÈGE SOCIAL

Rue du Lombard 42, B-1000 Bruxelles
Tél. 02/502 66 90
Fax 02/502 81 80
E-mail : info@bbri.be
Site Internet : www.cstc.be

BUREAUX

Lozenberg 7, B-1932 Sint-Stevens-Woluwe
Tél. 02/716 42 11
Fax 02/725 32 12

- Avis techniques – Publications
- Gestion – Qualité – Techniques de l'information
- Développement – Valorisation
- Agréments techniques – Normalisation

STATION EXPÉRIMENTALE

Avenue Pierre Holoffe 21, B-1342 Limelette
Tél. 02/655 77 11
Fax 02/653 07 29

- Recherche et innovation
- Formation
- Bibliothèque

BRUSSELS GREENBIZZ

Rue Dieudonné Lefèvre 17, B-1020 Bruxelles
Tél. 02/233 81 10