

WOODSTONE

Murs doubles en briques apparentes sur support bois

Pilote et partenaires :



ÉTUDE 2023 - 2025

mecd.fr

PREAMBULE

Ce rapport présente les résultats d'une étude exploratoire conduite par l'Institut MECD.

Les informations et analyses qui y figurent ont une vocation informative, et ne doivent pas être interprétées comme des recommandations ou des prescriptions techniques.

CONTRIBUTEURS

Nous tenons à exprimer notre gratitude aux membres du groupe de travail pour leur contribution à la réalisation de cette étude.

BERTEL Laetitia	CTMNC
CATTEROU Thomas	FCBA
DELAGÉ Madeline	CTMNC
DURIF Sébastien	Institut Pascal
FIABANE Maxime	FCBA
GOURDET Claire	FCBA
HAMMOUDI Imane	Institut Pascal
JAAFARI Chaimaa	Institut Pascal
LÉ Bérengère	CTMNC
LEBONNOIS Quentin	CTMNC
SANEH Maria	CTMNC

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier chaleureusement les entreprises qui nous ont aidés dans le cadre du projet WOODSTONE.

Un grand merci à la société Leviat pour son accompagnement dans nos réflexions, et la fourniture des attaches nécessaires aux essais.

Nous remercions également les sociétés Briqueteries du Nord et Wienerberger pour la mise à disposition des briques indispensables à nos tests. Nous sommes particulièrement reconnaissants envers Briqueterie du Nord pour la mise à disposition de maçons afin de réaliser les murs destinés aux essais à grande échelle. Leur soutien et leur expertise ont été précieux pour la réussite de notre projet.

Enfin, nous remercions toutes les personnes impliquées dans ce projet pour leur contribution et engagement.

Sommaire

PREAMBULE.....	2
CONTRIBUTEURS.....	2
REMERCIEMENTS.....	2
FINANCEMENT	7
PARTENAIRES	9
ABSTRACT	10
1. ETAT DE L'ART	11
1.1. Contexte général.....	11
1.2. Introduction sur les murs doubles.....	11
1.3. Contexte normatif en France	12
1.4. « Quelques » règles de l'art en France et à l'étranger	13
1.4.1. Pratiques en France	13
1.4.2. Pratique à l'étranger	19
1.4.3. Synthèse.....	27
1.5. Etudes/Recherches existantes sur la liaison des murs doubles	28
1.6. Objectifs de l'étude.....	31
2. DOMAINE D'EMPLOI.....	32
2.1. Sollicitations prises en compte.....	32
2.1.1. Charges verticales	32
2.1.2. Charges horizontales.....	33
2.2. Autres sollicitations	34
2.2.1. Séisme.....	34
2.2.2. Sécurité incendie	35
3. DESCRIPTION DU PROCEDE CONSTRUCTIF	36
3.1. Support bois	37
3.2. Maçonnerie	37
3.2.1. Briques	37
3.2.2. Mortiers de montage	38
3.2.3. Joints de montage.....	39
3.3. Consoles et linteaux.....	40
3.4. Assemblage entre ossature bois et maçonnerie	41
3.4.1. Attaches	41
3.4.2. Implantation des attaches	42

3.5.	Protection vis-à-vis des intempéries	42
3.5.1.	Lame d'air	43
3.5.2.	Pare-pluie.....	47
3.6.	Réalisation des encadrements de baies	48
3.7.	Choix des composants dans le cadre de cette étude	51
3.7.1.	Maçonnerie.....	51
3.7.2.	Ossature en Bois	53
3.7.3.	Liaison Ossature en bois - Maçonnerie.....	54
3.8.	Mise en œuvre	56
3.8.1.	Mise en œuvre des attaches plates sur rail	56
3.8.2.	Mise en œuvre des attaches filaires sur tasseaux	57
4.	PERFORMANCES ATTENDUES ET STRATEGIE D'ETUDE.....	59
4.1.	Etanchéité à l'air	59
4.2.	Etanchéité à l'eau	59
4.3.	Compatibilité de déformation entre les 2 murs	59
4.3.1.	Dilatations, retraits, gonflements dus aux variations de températures et d'humidité	59
4.3.2.	Déplacements verticaux du bois et de la maçonnerie	60
4.3.3.	Déplacements horizontaux	61
4.3.4.	Compatibilité des déformations	61
4.4.	Stabilité hors plan du parement en maçonnerie	61
4.5.	Stratégie d'étude pour répondre aux exigences.....	62
5.	ESSAIS PETITE ECHELLE	63
5.1.	Plan d'expérience	63
5.2.	Détermination de la résistance à la compression des briques	64
5.3.	Caractérisation du mortier de pose.....	65
5.4.	Caractérisation mécanique des attaches.....	67
5.5.	Caractérisation de la liaison brique/mortier : essais de cisaillement.....	68
5.6.	Caractérisation de l'ancrage des attaches : essais de traction et de compression sur attaches	72
6.	MODELISATION NUMERIQUE DES ATTACHES PAR ELEMENTS FINIS	82
6.1.	Description du modèle.....	82
6.1.1.	Géométrie	82
6.1.2.	Lois de comportement.....	83
6.1.3.	Modèle cohésif brique-mortier.....	87
6.2.	Modèle complet attache mortier brique	88
6.2.1.	Attache plate en traction	88
6.2.2.	Attache filaire en traction	90
6.3.	Analyse paramétrique.....	92
6.3.1.	Attache plate en traction : effet de l'excentrement dans le rail.....	92
6.3.2.	Attache plate en compression : influence du casse -goutte	93
6.3.3.	Attache plate en compression : Défaut de planéité	94
6.3.4.	Influence des paramètres mortier et/ou du modèle cohésif brique-mortier.....	95
7.	ESSAIS A GRANDE ECHELLE	97
7.1.	Présentation du protocole global.....	97

7.2.	Description des maquettes	97
7.3.	Essais de déformation différentielle	99
7.3.1.	Principe de l'essai.....	99
7.3.2.	Machine d'essais	99
7.3.3.	Montage d'essai.....	99
7.3.4.	Chargement	100
7.3.5.	Conditions limites	100
7.3.6.	Expression des résultats.....	100
7.4.	Essais de vieillissement mécanique cyclique par une mise en parallélogramme	101
7.4.1.	Principe de l'essai.....	101
7.4.2.	Machine d'essais	101
7.4.3.	Montage d'essai.....	101
7.4.4.	Cycle de déformations	102
7.4.5.	Conditions limites	102
7.4.6.	Expression des résultats.....	102
7.5.	Essais d'étanchéité à l'eau et de résistance à la charge due au vent	103
7.5.1.	Principe de l'essai.....	103
7.5.2.	Séquence d'essais	103
7.5.3.	Montage d'essais	103
7.5.4.	Essai d'étanchéité à l'eau.....	103
7.5.5.	Essai de résistance à la charge due au vent.....	104
7.5.6.	Essai de résistance à la charge due au vent avec une charge au vent accrue	105
7.6.	Essai de déformation différentielle jusqu'à un déplacement de 30 mm	105
7.7.	Instrumentation – mesures.....	106
7.8.	Résultats des essais avec attaches filaires	107
7.8.1.	Déformations différentielles.....	107
7.8.2.	Mise en parallélogramme cyclique	108
7.8.3.	Etanchéité à l'eau et résistance au vent	108
7.8.4.	Déformations différentielles jusqu'à 30 mm	110
7.9.	Résultats des essais avec attaches plates	111
7.9.1.	Déformations différentielles	111
7.9.2.	Mise en parallélogramme	112
7.9.3.	Etanchéité à l'eau et résistance au vent	113
7.9.4.	Déformations différentielles jusqu'à 30 mm	114
7.10.	Interprétation et analyse	114
7.10.1.	Essais de déformations différentielle et de mise en parallélogramme	114
7.10.2.	Essais d'étanchéité à l'eau et de résistance au vent.....	114
7.10.3.	Essai de déformation différentielle jusqu'à 30 mm	116
7.10.4.	Conclusion sur les essais à grande échelle.....	116
8.	ENVIRONNEMENT	117
8.1.	Contexte	117
8.2.	Description des systèmes de mur double sur ossature bois	117
8.3.	Source des données environnementales.....	118
8.3.1.	Mur à Ossature en Bois (MOB)	118
8.3.2.	Tasseaux de bois	120
8.3.3.	Mur en briques	121
8.3.4.	Éléments en acier et systèmes d'attaches filaires/plates	122
8.4.	Résultats	123
8.4.1.	Présentation des résultats à l'échelle des murs doubles WOODSTONE (4,4 m ² de paroi avec ouverture) 123	
8.4.2.	Présentation des résultats pour 1m ² de murs doubles WOODSTONE (sans ouverture)	129

9. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	132
9.1. Conclusions.....	132
9.1.1. Essais à petite échelle	132
9.1.2. Modélisation numérique	132
9.1.3. Essais à grande échelle	133
9.2. Perspectives.....	134
9.2.1. Modélisation numérique	134
9.2.2. Consoles et linteaux.....	134
9.2.3. Encadrement de baie	135
9.2.4. Extension à la pierre, la brique de terre crue	135
9.2.5. Domaine d'emploi.....	135
BIBLIOGRAPHIE.....	137
ANNEXES	141
A1. BENCHMARK DES ATTACHES ET MORTIERS ET DE LEURS PRINCIPALES PROPRIETES	141
A2. PLANS DES MAQUETTES – ESSAIS A GRANDE ECHELLE.....	147
A3. DESCRIPTION DU CYCLE DE VIE D'UN PRODUIT SELON NF EN 15804+A2	151
A4. RESULTATS A L'ECHELLE DES MURS DOUBLES WOODSTONE (4,4 M² DE PAROI AVEC OUVERTURE)	152
A5. RESULTATS A L'ECHELLE DE 1 M² DE MURS DOUBLES WOODSTONE (SANS OUVERTURE)	154
INDEX DES FIGURES	157
INDEX DES TABLEAUX.....	160

FINANCEMENT

Le projet WOODSTONE est cofinancé par trois partenaires : l'institut Carnot MECD dans le cadre d'un projet de ressourcement, accompagné du CODIFAB et de la FFTB.



Afin de réduire les impacts environnementaux des bâtiments et ouvrages de génie civil, le secteur de la construction est en mutation profonde. Cette évolution transforme son activité et structure le champ de la recherche et de l'innovation en matière de conception de produits et de systèmes constructifs. L'Institut MECD (Matériaux et Equipements pour la Construction Durable), fort de la compétence et de la complémentarité de ses membres répartis sur le territoire métropolitain, est au service de ces acteurs de la construction. Il les aide à renforcer leur offre technologique en mettant celle-ci en phase avec les attentes sociétales, lesquelles se traduisent le plus souvent par des évolutions réglementaires.

Les quatre cents chercheurs de l'Institut MECD exploitent leurs plateformes de caractérisation et de test pour travailler, de l'échelle du matériau à celle du bâtiment complet, au profit de sociétés qui souhaitent inscrire leurs solutions dans les transitions énergétique et environnementale et dans l'économie circulaire.

L'Institut MECD est labellisé Institut Carnot depuis le 7 février 2020.
<https://mecd.fr/>



Le CODIFAB, Comité Professionnel de Développement des Industries Françaises de l'Ameublement et du Bois, a pour mission de conduire et financer, par le produit de la Taxe Affectée, des actions d'intérêt général en faveur des fabricants français de l'ameublement (meubles et aménagements) et du bois (menuiseries, charpentes, panneaux, bois lamellé, CLT, ossature bois, ...). Le CODIFAB fédère et rassemble 4200 PME/ETI et plus de 10000 artisans, représentés par leurs organisations professionnelles :



Les actions collectives ont pour objectif d'accompagner les entreprises de création, de production et de commercialisation par : une meilleure diffusion de l'innovation et des nouvelles technologies, l'adaptation aux besoins du marché et aux normes environnementales, la promotion, le développement international, la formation, et par toute étude ou initiative présentant un intérêt pour l'ensemble de la profession.

Pour en savoir plus : <http://www.codifab.fr>



La FFTB agit pour représenter l'industrie des Tuiles et Briques. Elle est force de proposition pour améliorer son environnement national et européen. Elle informe sur le rôle des produits de construction terre cuite pour créer des bâtiments pérennes, respectueux de l'environnement et favorisant une croissance durable et responsable. Elle enrichit le dialogue et accompagne les évolutions sociales par la négociation des accords et avenants à la convention collective, en menant des actions sur les qualifications et les métiers de la filière, et pour promouvoir les bonnes pratiques. Par délégation de l'INSEE, la FFTB centralise et diffuse les statistiques de la profession. Elle accompagne les entreprises pour clarifier l'application des règles techniques et juridiques. <https://tuilesetbriques.org/>

PARTENAIRES

Ce projet a été mené par trois partenaires, membres de MECD :



Le CTMNC Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction est un Centre Technique et Industriel (membre du réseau CTI) qui œuvre pour les filières des matériaux de construction en terre cuite et en pierre naturelle. Le CTMNC est à la fois un pôle d'excellence technologique, qui travaille en partenariat étroit avec les professionnels, et un organisme de formation et de veille technologique, qui offre une palette de services étendue.

www.ctmnc.fr



INSTITUT TECHNOLOGIQUE

L'Institut technologique **FCBA** est un Centre Technique Industriel (CTI) qui accompagne les différentes entreprises de l'ensemble des industries de la forêt, de la cellulose, du bois, de la construction et de l'ameublement, dans leur développement et dans l'amélioration de leur compétitivité. Il les aide à intégrer les innovations technologiques et à s'adapter à l'évolution rapide des marchés.

www.fcba.fr



Institut Pascal

L'Institut Pascal est une unité mixte de recherche et de formation interdisciplinaire de 370 personnes placées sous la triple tutelle de l'Université Clermont Auvergne (UCA), du CNRS et de l'INP Clermont Auvergne. Il est organisé en 5 axes thématiques (GePEB, ISPR, M3G, Photon, TGI) et s'appuie sur les moyens d'essais de ses plateformes associées (MSGC, Ecografi, CTT SIGMA et 2Matech).

www.institutpascal.uca.fr

ABSTRACT

Le projet WOODSTONE, mené par le CTMNC, l'Institut technologique FCBA et l'Institut Pascal, vise à fiabiliser la solution de murs doubles maçonnés sur supports en bois, pour permettre son développement.

Des justifications techniques de faisabilité du système constructif de mur double maçonné sur COB ont été réalisées. Pour cela, l'étude a porté sur 3 axes : une modélisation du comportement de l'assemblage brique-mortier-attache, une campagne d'essais à cette même échelle pour alimenter le modèle et valider les choix de matériaux pour ensuite mener une campagne d'essai à grande échelle, afin d'évaluer le système constructif dans des conditions proches de l'usage réel. Pour cette étude, il a également été choisi d'évaluer différentes solutions, en faisant varier les composants du système : type de brique (pleines ou perforées), type de montage (à joint épais ou semi épais), type d'attache (filaire ou plate avec rail).

Afin d'alimenter les simulations numériques et de valider la compatibilité des éléments du complexe brique-mortier-attache, il a été nécessaire de caractériser par essais chaque élément du complexe, ainsi que le comportement aux interfaces du complexe. L'interface entre briques et mortier a été caractérisée par des essais de cisaillement sur des triplets de briques maçonnées. Le comportement des attaches dans le complexe a lui été caractérisé par des essais de traction et de compression des attaches ancrées entre les briques maçonnées. Des essais complémentaires ont été réalisés pour étudier le détachement de l'attache plate de son rail support.

La calibration du modèle éléments finis a été réalisée sur la base de ces essais élémentaires en termes de rigidité et de résistance. Une fois le modèle validé, celui-ci a été utilisé pour une analyse paramétrique afin d'évaluer l'influence de différents paramètres sur le comportement mécanique des deux types d'attaches étudiés en traction et compression.

Enfin, pour évaluer la stabilité et la conservation de l'étanchéité à l'eau du système, différents essais ont été réalisés sur des maquettes à grande échelle, représentatifs du système global. Tout d'abord, deux essais mécaniques ont été effectués : un essai de mise en parallélogramme et un essai de déplacement vertical différentiel. Ces essais ont été suivis d'un essai d'étanchéité à l'eau et de résistance au vent. Enfin, les maquettes ont été soumises à un essai mécanique simulant des conditions sévères, avec un déplacement vertical différentiel allant jusqu'à 30 mm, ceci afin d'étudier le comportement du système sous forte sollicitation.

Les résultats permettent de valider les préconisations et conceptions détaillées dans ce rapport pour un procédé de mur double maçonné sur ossature bois et CLT. Ce système constructif s'applique à des bâtiments à usage d'habitation, ERP ou bâtiments de bureaux ou industriels ayant jusqu'à trois niveaux ($\leq R+2$), et de hauteur maximale 10m.

1. Etat de l'art

1.1. Contexte général

L'un des leviers de la **construction Bas Carbone** est la **mixité des matériaux**, en particulier l'association des matériaux bio et géo-sourcés, en profitant des qualités intrinsèques de chacun d'entre eux. Cela se matérialise, sur le marché de la construction, par des demandes répétées de la part d'acteurs de la construction pour le développement de solutions mixtes, et notamment sur l'association entre le bois et la terre cuite/terre crue/pierre naturelle. Ces solutions intéressent ingénieurs et architectes aussi bien pour **leurs caractéristiques techniques et environnementales**, que pour **leurs qualités esthétiques**. Entre autres atouts, la solution de mur double en briques apparentes (briques de parement) sur structures à ossature bois (COB) apporte de bonnes performances thermiques, hydriques et acoustiques. Le projet WOODSTONE, mené par le CTMNC, l'Institut technologique FCBA et l'Institut Pascal, vise à fiabiliser cette solution de murs doubles pour permettre son développement.

1.2. Introduction sur les murs doubles

Les systèmes de murs doubles sont constitués dans l'épaisseur de la paroi, de l'extérieur vers l'intérieur, d'un parement extérieur fondé en pied maintenu par des attaches de liaison, d'une lame d'air ventilée, et d'une paroi porteuse intérieure. Dans le cas de cette étude, le parement extérieur est constitué d'une maçonnerie en briques apparentes de terre cuite reprenant son poids propre, et la paroi porteuse est une paroi de construction à ossature bois.

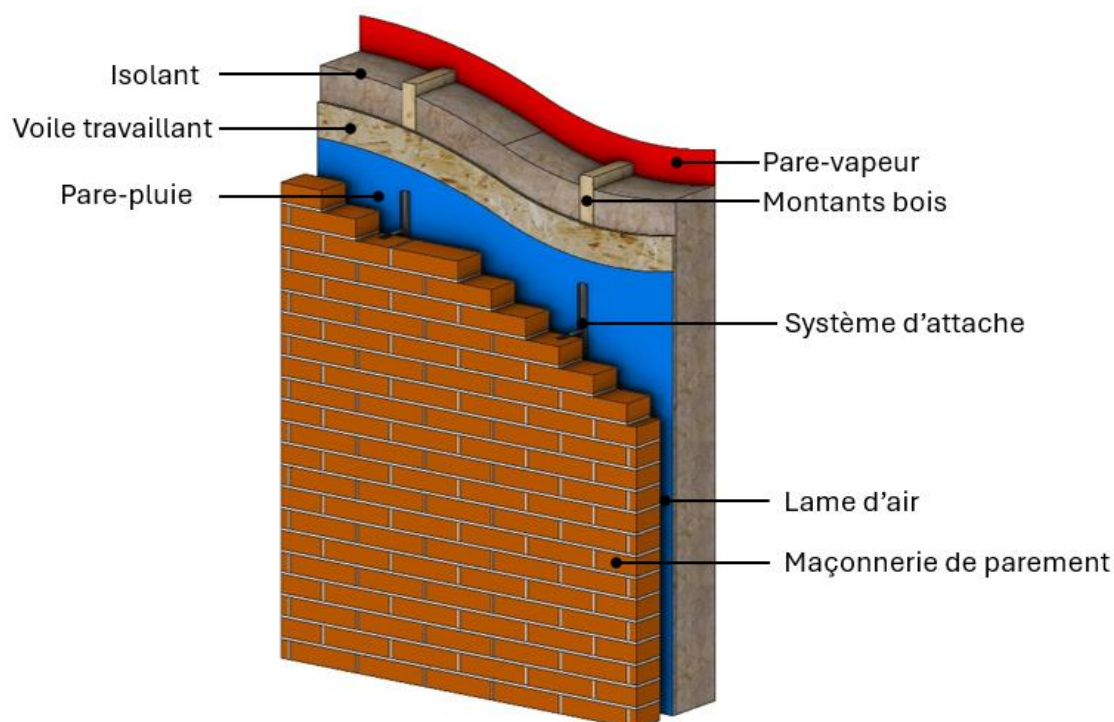


Figure 1 - Schéma de principe d'un mur-double maçonné sur ossature bois

L'étanchéité à l'eau du mur est assurée par une triple barrière : la maçonnerie de parement protège en grande partie de l'exposition à l'eau de pluie, la lame d'air ménagée entre celle-ci et l'ossature bois et un pare-pluie qui complète le dispositif.

La lame d'air ventilée assure la salubrité de la paroi à ossature bois et évite la stagnation d'humidité en cas d'infiltration d'eau en permettant son évacuation. Au droit de chaque interruption de la lame d'air (en pieds des façades, au niveau des linteaux, etc.), les eaux infiltrées sont drainées vers l'extérieur.

1.3. Contexte normatif en France

Lors de la révision du NF DTU 20.1 : 2008 [1], les chapitres décrivant les ouvrages de murs doubles en briques ou pierres naturelles associés aux constructions à ossature en bois ont été supprimés, des précisions techniques complémentaires étant jugées utiles, sur un certain nombre de points :

- détails sur les types d'attaches ou tiges anti-dévers compatibles avec les procédés visés ;
- densités/distributions horizontale et verticale des attaches & capacités de reprise d'efforts en traction/compression ;
- déformations différentielles entre la maçonnerie et la paroi en bois ;
- traitement des pourtours de baies au regard des contraintes d'étanchéité à l'air et à l'eau spécifiques aux systèmes constructifs bois ;
- gestion des perçages éventuels des membranes pare-pluie par les attaches ;
- dispositions/traitements en pied et en tête des parois en bois ; dispositions à prévoir vis-à-vis du risque incendie ;

La technique du mur double maçonné sur ossature bois est donc sortie du périmètre de la technique courante et les dispositions prévues pour cette technique dans le NF DTU 31.2 [2] ont été retirées, par harmonisation, à l'occasion de la révision de 2019.

1.4. « Quelques » règles de l'art en France et à l'étranger

1.4.1. Pratiques en France

❖ NF DTU 20.1 (sur support béton ou maçonné) [3]

La NF DTU 20.1 prend en compte cinq catégories de repos de la paroi externe :

- Catégorie A1 : Le mur de parement repose sur la dalle de plancher qui est continue jusqu'à la façade ;
- Catégorie A2 : La paroi extérieure repose sur le plancher sur les 2/3 au moins de son épaisseur ;
- Catégorie A3 : Avec demi-repos de la paroi externe sur le plancher ;
- Catégorie A4 : La paroi externe repose entièrement sur une console métallique ;
- Catégorie A5 : Le débord de la paroi externe sur la console métallique est compris entre 1 cm et un tiers de l'épaisseur.

La paroi externe peut filer sur un, deux ou trois niveaux. Le plancher repose donc uniquement sur la paroi interne. La paroi externe est liée à la paroi interne porteuse par des attaches.

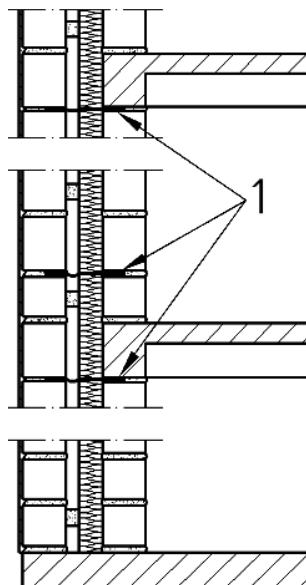


Figure 2 - Mur double à paroi externe filante devant les planchers. La légende 1 correspond aux attaches.

Dispositions en pied :

- Un joint vertical est laissé non-garni tous les mètres environ dans la première assise de la maçonnerie, sur une hauteur de 5 cm au moins.
- Le relevé du matériau étanche placé dans la rigole doit être au minimum de 10 cm et, en tous cas, de 3 cm de plus que la hauteur de l'exutoire. À leur extrémité, les bandes de relevé sont placées à recouvrement minimal de 20 cm.

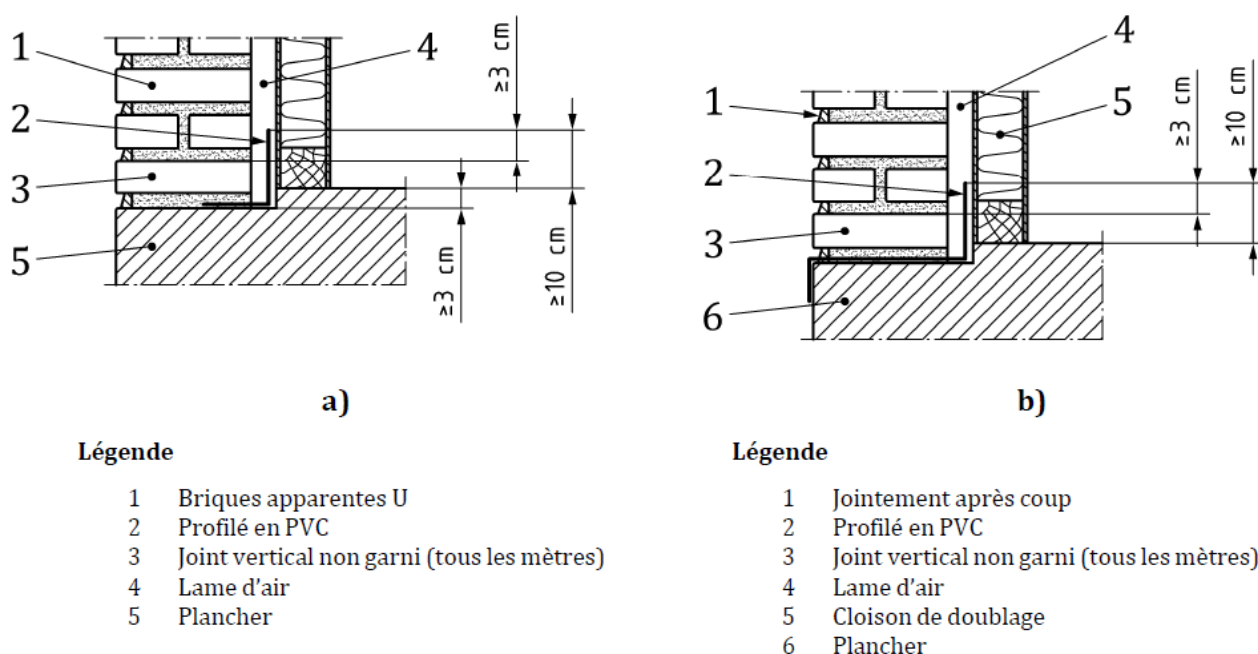


Figure 3 - Exemples de dispositions en pied de mur dans le cas de maçonneries non enduites (DTU 20.1 P1-1)

La stabilité de la paroi externe est assurée par liaison à la paroi interne avec l'aide d'attaches. La lame d'air est de 3 cm au minimum s'il n'est pas prévu d'isolation thermique entre les deux parois et de 2 cm au minimum si l'isolation thermique est prévue.

Linteaux : La longueur d'appui des linteaux sur la maçonnerie est déterminée en appliquant les règles de calcul et les dispositions constructives minimales du NF DTU 20.1 P3. Elle ne peut pas être inférieure à 0,20 m (pour des linteaux isolés).

Le linteau du mur extérieur peut être réalisé soit :

- En béton armé coulé en place ou préfabriqué ;
- À l'aide d'une cornière métallique visible en sous-face ;
- À l'aide d'une console de supportage visible ;
- À l'aide d'une console de supportage invisible, pour éléments suspendus.

❖ **Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012, Recommandations professionnelles 'Murs doubles avec isolation thermique par l'extérieur', 2014 [4] (sur support béton ou maçonné):**

Ci-dessous figurent des extraits des recommandations professionnelles Murs doubles avec ITE :

"Le choix d'un type de console de supportage dépend des charges à reprendre, du type de maçonnerie à monter, et de la nature du mur support. Leur résistance mécanique doit être adaptée aux sollicitations.

Il est nécessaire de privilégier les abouts de planchers ou de dalles pour l'ancrage des dispositifs de fixation de la console."

"Les joints de dilatation sont réalisés sous forme de joints souples ou de joints vides divisant la maçonnerie de parement en sections indépendantes. Les joints de dilatation permettent une certaine déformation de la maçonnerie sous l'effet de la dilatation thermique, afin d'éviter l'apparition de fissures."

Joints de fractionnement : "La longueur des pans de mur ainsi réalisés ne doit pas excéder 12 m."

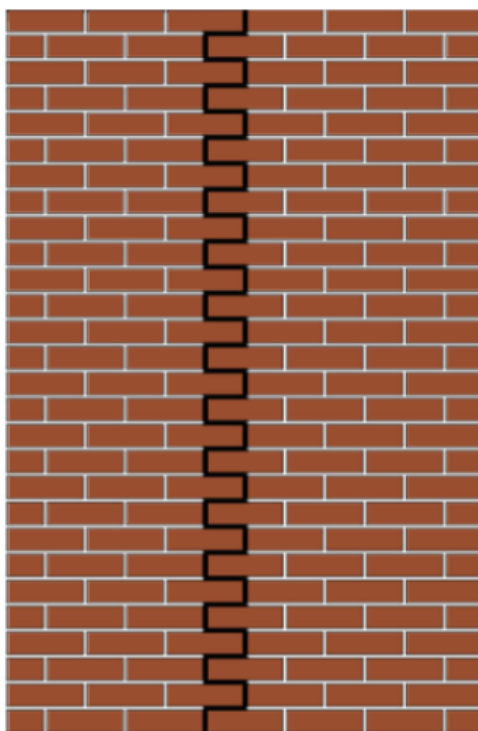


Figure 4 - Joint dit en “fermeture éclair” ou “en escalier”.

“Au cas où l’on associe divers matériaux (par exemple lors de l’utilisation de linteaux en béton armé), il est conseillé de prévoir des joints dissimulés, afin de tenir compte du risque de fissures dues à une différence de comportement thermique.”

“Repos du mur de parement sur semelle au niveau des fondations :

La fondation est alors dimensionnée en conséquence. Le poids du mur de parement notamment ne doit pas être négligé dans le calcul de l’équilibre de la fondation.

Pour un mur de parement en brique, on pourra utiliser, pour les assises enterrées, un bloc de béton préfabriqué ou des briques à faible capillarité et résistantes au gel (voir NF EN 771-1[5] et son complément national).”

Différents procédés sous DTA décrivent des solutions destinées à la prise en compte du risque sismique, dont ceux listés ci-dessous :

❖ **DTA 16/23-795_V1 sur le ' Procédé de mur double TERCA en zone sismique' sur support porteur en béton (Titulaire : Société WIENERBERGER SAS & Société FIXINOX SA) [6] :**

Le procédé visé par ce DTA est destiné à la réalisation de parois extérieures non porteuses de murs doubles en maçonnerie de briques de terre cuite laissées apparentes de 90 à 110 mm d'épaisseur, rapportées sur un mur porteur en béton de 15 cm d'épaisseur minimale par l'intermédiaire d'organes de supportage en acier et d'attaches réparties sur la surface de l'ouvrage.

La tenue du système en zone sismique est gérée par le biais des dispositions suivantes :

- Console de supportage spéciale sismique de la société Fixinox ;
- Densification des attaches sur les bords des ouvrages (angles, tableau de fenêtre...), voir Figure 5 ;
- Disposition des attaches à 45° en tête de mur.

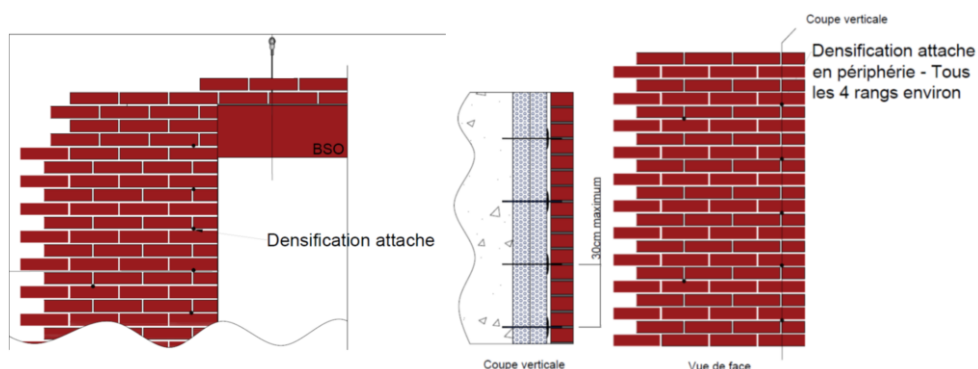


Figure 5 - Densification des attaches à l'ouverture et en périphérie de maçonnerie (DTA 16/23-795_V1)

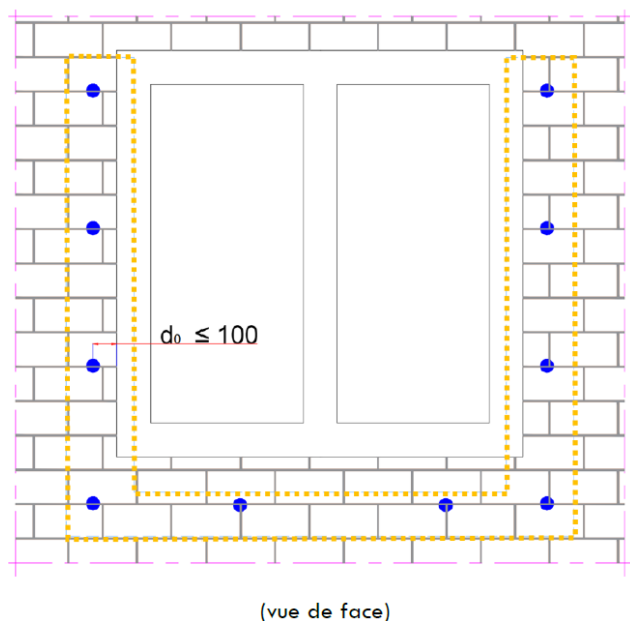
❖ **ATEX-n° 3304_V1 de cas a (société LR ETANCO) :**

Le procédé visé par cette ATEEx est destiné à la réalisation en situation sismique de maçonneries de façade non porteuses constituant le parement extérieur d'un mur double de bâtiments neufs ou en rénovation en France métropolitaine. Le parement extérieur est en maçonnerie de briques de terre cuite laissées apparentes d'épaisseur comprise entre 90 et 110 mm, rapportées sur un mur porteur en béton de 15 cm d'épaisseur minimale par l'intermédiaire d'organes de supportage en acier et d'attaches réparties sur la surface de l'ouvrage. Ces parois sont maçonnées à joints épais ou semi-épais, d'épaisseurs comprises entre 5 et 15 mm. Les joints verticaux sont non remplis.

Cette ATEEx présente notamment des dispositions spécifiques à l'utilisation en zone sismique. Parmi ces dispositions, nous pourrions noter :

- Des attaches de liaison à 90° complémentaires (densification) sont installées :
 - Au droit des angles et joints de fractionnement ou de dilatation à raison d'une attache tous les 4 rangs de briques environ, positionnées au plus à $d_0 \leq 100$ mm de l'extrémité du joint.
 - En périphérie des ouvertures (tableaux des fenêtres) à raison d'une attache tous les 4 rangs de briques environ, positionnées au plus à $d_0 \leq 100$ mm de l'angle vif de l'ébrasement et en veillant à positionner une première rangée horizontale d'attaches sous l'appui de fenêtre au 2ème ou 3ème rang de briques.

- Au droit des linteaux, le supportage des briques de parement doit permettre le libre déplacement horizontal du parement et ne pas former de point dur (p.ex. cornière en L désolidarisée de la paroi interne ou consoles avec trous oblongs).



● Attache à 90° en périphérie d'ouverture □ Densification des attaches à 90° – 1 attaches tous les 4 rangs
Figure 6 - Principe de densification des attaches à 90° au droit des ouvertures (ATEX-n° 3304_V1)

La méthode de vérification de la capacité portante des consoles de supportage et cornières en L est aussi présentée. En situation normale, la capacité portante de la console LR BRICK seule (hors fixations vérifiées par ailleurs) est vérifiée systématiquement sous la charge F_k excentrée induite par le poids propre du parement, au regard de la charge admissible (ELS) et de la déformation limite fixée à $L_g / 500$ où L_g est la distance entre deux goussets (raidisseurs avec point de fixation) de la console.

La charge ultime est déterminée par le service technique du fabricant de console conformément à la NF EN 845-1 par modélisation aux éléments finis sur la base des propriétés des tôles d'acier utilisées pour la fabrication des consoles et en tenant compte de l'excentricité de la charge appliquée ainsi que de l'effet de levier induit par la compression en base de console.

De même, il convient de vérifier que la déformabilité des cornières de linteau en L n'excède pas $L_c/500$ ou L_c est la portée de la cornière.

❖ ATEX-n°2864_V2 de cas a (Techni-Process) [7] :

Le procédé visé par cette ATEX est destiné à la réalisation de murs non porteurs constituant la paroi extérieure de murs doubles. Cette paroi est en maçonnerie d'éléments en béton laissés apparents de 80 ou 90 mm d'épaisseur, rapportée sur un mur porteur en bois par l'intermédiaire des systèmes de supportage en acier et d'attaches anti-dévers réparties sur la surface de l'ouvrage. Le mur extérieur est supporté par la fondation ou une console métallique dimensionnée en conséquence. Il est recommandé de :

- Limiter la flèche des planchers à 5 mm conformément au DTU 33.1 dans le cas de la FOB conforme au NF DTU 31.4 ;

- Prévoir un joint entre la tête des panneaux et le plancher supérieur équivalent à 1,5 fois la flèche du niveau supérieur dans le cas de la FOB conforme au DTU 31.4 ;
- Réaliser des essais AEV « façades » lorsque la hauteur de la façade est ≥ 18 m ;
- Ne pas utiliser le procédé dans des ouvrages nécessitant des dispositions parasismiques.

Le double mur correspond à la catégorie A5 au sens du DTU 20.1, avec repos de la paroi externe sur cornière filante (console de supportage), avec les dispositions complémentaires suivantes spécifiques au support bois :

- Les consoles filantes et leurs fixations sont en acier inoxydable.
- La paroi externe est recoupée par une console filante à chaque niveau du bâtiment (la paroi filante sur 2 niveaux est exclue).
- La fixation de la console dans le support est réalisée soit dans l'épaisseur du plancher (ou poutre de rive), soit en pied de l'élément de paroi interne bois situé immédiatement au-dessus du plancher (la fixation en tête de la paroi interne bois est exclue).

Le système d'attaches de liaison en acier inoxydable (fixations comprises) permet un déplacement vertical (Figure 7).

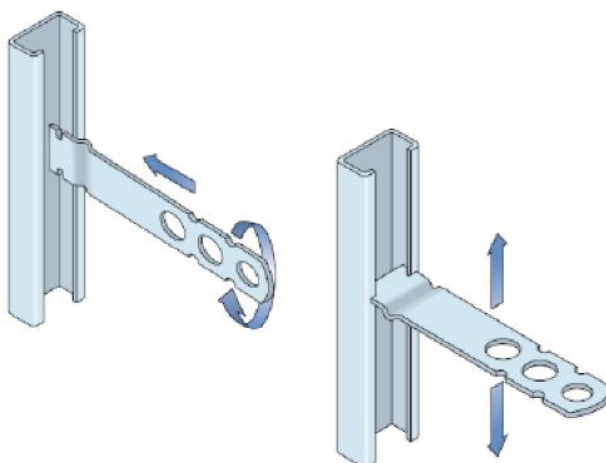


Figure 7 - Principe du rail ANCON 25/14 et de l'attache à blocage de forme ANCON YD25 ou YP25 visé dans l'ATEX-n°2864_V2

Une bavette de rejet d'eau (bande de polypropylène armée) est fixée au support bois au-dessus de chaque console filante.

La ventilation de la lame d'air (d'épaisseur minimale 30 mm) est assurée :

- en partie inférieure par un écartement des joints verticaux secs (non garnis) de 3 mm minimum pour les trois premières rangées situées au-dessus de la bavette de rejet d'eau ;
- en partie supérieure par un écartement des joints verticaux secs (non garnis) de 3 mm minimum pour les trois dernières rangées situées en-dessus de la tôle de protection de la console (ou de la console en l'absence de tôle de protection).

En partie supérieure du parement d'un étage, un jeu horizontal d'au moins 10 mm entre la dernière rangée et la sous-face de la cornière filante du niveau suivant (ou de la cornière de protection) est laissé pour permettre de compenser les variations dimensionnelles du parement (dilatation thermique) et de la paroi interne bois (retrait-gonflement) en service. Ce joint est garni de mastic sur fond de joint (le cas échéant un mastic coupe-feu) ;

Le parement situé au niveau des linteaux de menuiseries extérieures est supporté par une cornière métallique en L appuyée d'au moins 20 cm sur la maçonnerie de part et d'autre de l'ébrasement ; Les ébrasements des menuiseries extérieures sont systématiquement réalisés au moyen d'un habillage métallique (les retours de maçonnerie en tableau ne sont pas admis).

❖ **Procédé de paroi extérieure de murs doubles en briques sur des parois à ossature bois - projet Agora (Maison Alfort) [8]:**

Concernant l'ATEX de cas b du projet du bâtiment Agora à Maison Alfort, les fixations sont fournies par la société Etanco avec 5 attaches/m², la maçonnerie est assurée par la société BYN. La lame d'air est égale à 45mm. La maçonnerie est sans joint vertical pour assurer la ventilation. L'espacement des briques du premier rang est plus important pour l'évacuation éventuelle de l'eau. La fondation est en béton avec une bavette en continuité du pare-pluie. L'ossature en bois est surélevée de 3cm par rapport aux briques pour éviter tout contact avec eau.

1.4.2. Pratique à l'étranger

Les référentiels du domaine recensés à l'étranger sont cités ci-après :

1.4.2.1. Canada

❖ **Code de la construction du Québec en 2015 [9]:**

Le code national du bâtiment du Canada de 2015 (intégrant les modifications du Québec) permet de prendre en compte la structure porteuse avec éléments d'ossature en bois dans le cas du mur double. Le paragraphe **§ 9.20.9.5. Fixation pour contre-murs extérieurs en maçonnerie** donne certaines exigences pour la fixation du mur extérieur aux structures porteuses comme suit :

« 1) Les contre-murs extérieurs en maçonnerie d'une épaisseur d'au moins 75 mm reposant sur un appui doivent être fixés à la structure porteuse en maçonnerie ou aux éléments d'ossature en bois par des feuillards :

- a. protégés contre la corrosion ;
- b. d'au moins 0,76 mm d'épaisseur ;
- c. d'au moins 22 mm de largeur ;
- d. formant un lien mécanique avec le mortier ; et
- e. dont l'espacement est conforme au tableau 9.20.9.5.

2) Les feuillards protégés contre la corrosion décrits au paragraphe 1) et qui sont fixés aux éléments d'ossature en bois, doivent :

- a) être pliés à angle droit à moins de 6 mm de la fixation ; et
- b) être fixés à l'aide de vis ou de clous torsadés résistant à la corrosion de 3,18 mm de diamètre pénétrant d'au moins 63 mm dans le bois.

3) Les éléments d'un contre-mur extérieur en maçonnerie supportés individuellement par une structure porteuse en maçonnerie ou une ossature de bois doivent être fixés conformément à la sous-section 4.3.2.

Tableau 9.20.9.5.
Espacement des feuillards pour contre-mur extérieur
 Faisant partie intégrante du paragraphe 9.20.9.5. 1)

Espacement vertical maximal, en mm	Espacement horizontal maximal, en mm
400	800
500	600
600	400

Le code canadien préconise également des dispositifs d'évacuation d'eau en pied de lame d'air. Le paragraphe **§ 9.20.13. Protection contre la pluie** donne des exigences sur les matériaux et les dimensions des solins ainsi que des emplacements et des exigences de fixation. Notamment, le paragraphe **§ 9.20.13.6. Solins sous chantepleures de contre-murs extérieurs en maçonnerie** précise :

« 2) Les solins posés sous les chantepleures du contre-mur extérieur en maçonnerie d'un mur à ossature de bois doivent déborder d'au moins 5 mm par rapport à la face extérieure de l'élément de construction au-dessous du solin et remonter de 150 mm le long du mur à ossature de bois.

3) Si un mur à ossature de bois est recouvert d'une membrane de revêtement intermédiaire, d'un revêtement extérieur isolant rigide ne contenant pas de bois ou d'un isolant semi-rigide comportant une membrane de revêtement intégrée, les solins doivent remonter derrière la membrane de revêtement ou l'isolant. »

Le paragraphe **§ 9.20.13.8. Chantepleures exigées** précise :

« 1) Il faut prévoir des chantepleures espacées d'au plus 800 mm en partie inférieure :

a) de vides de murs creux; et

b) de vides ou de lames d'air de contre-murs extérieurs en maçonnerie. »

Le paragraphe **§9.20.5.2. Linteaux et arcs** précise :

« 1) La maçonnerie au-dessus d'une ouverture doit être supportée par un linteau d'acier, de béton armé, de maçonnerie ou par un arc de maçonnerie.

2) Les cornières d'acier supportant un contre-mur extérieur en maçonnerie au-dessus des ouvertures doivent :

a) être conformes au tableau 9.20.5.2.; et

b) avoir une longueur d'appui d'au moins 90 mm

Tableau 9.20.5.2.
Portée maximale admissible pour les linteaux en acier supportant un contre-mur extérieur en maçonnerie
 Faisant partie intégrante du paragraphe 9.20.5.2. 2)

Dimensions minimales des cornières, en mm			Portée maximale admissible, en m		
Aile verticale	Aile horizontale	Épaisseur	Brique de 75 mm	Brique de 90 mm	Pierre de 100 mm
89	76	6,4	2,55	—	—
89	89	6,4	2,59	2,47	2,30
102	89	6,4	2,79	2,66	2,48
127	89	7,9	3,47	3,31	3,08
127	89	11	3,64	3,48	3,24

3) Les cornières d'acier supportant des éléments de maçonnerie, à l'exception d'un contre-mur en maçonnerie, les linteaux en béton armé et en maçonnerie et les arcs de maçonnerie doivent être conçus pour supporter la charge prévue, conformément à la partie 4.

4) Les cornières d'acier supportant une maçonnerie au-dessus des ouvertures doivent être recouvertes d'une couche d'apprêt ou être protégées par d'autres moyens contre la corrosion. »

❖ SCHL - Guide 'Construction de maison à ossature bois' - Canada [10]:

- L'arase des fondations doit offrir un appui ou un épaulement suffisamment large pour ménager une lame d'air d'environ 25 mm de profondeur entre la maçonnerie et la membrane de revêtement intermédiaire.
- Le solin de base doit partir de la face extérieure du mur, couvrir l'appui et remonter d'au moins 150 mm le long du mur derrière le revêtement intermédiaire.
- Des attaches métalliques doivent être protégées contre la corrosion.
- Il faut prendre soin de ne pas laisser tomber de mortier entre le mur de parement et la membrane de revêtement intermédiaire, ce qui obstruerait la lame d'air.

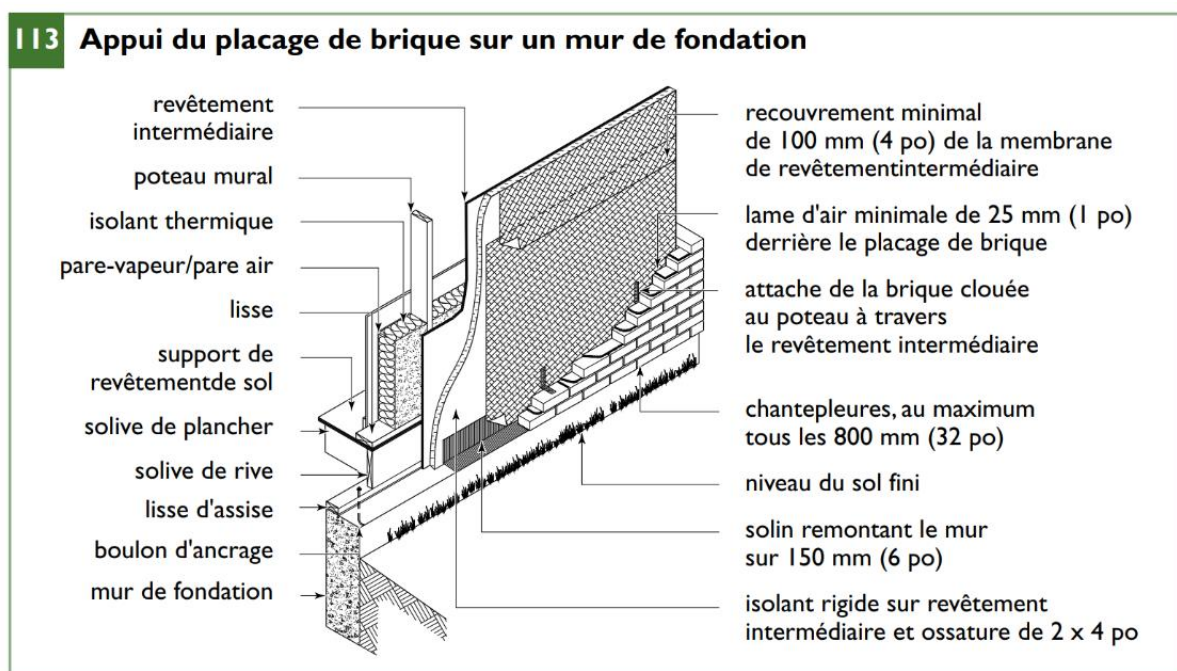


Figure 8 - Illustration du mur-double dans le SCHL - Guide 'Construction de maison à ossature bois' - Canada

❖ **FPIinnovations, Fiche technique de bonnes pratiques Parement de maçonnerie sur un bâtiment en ossature de bois [11]**

La fiche technique précise un certain nombre de recommandation pour concevoir un mur double bois-maçonnerie. Les recommandations sont résumées dans les points suivants. Un exemple de joint horizontal avec cornière acier est donné à la Figure 9.

- Dans tous les cas, les maçonneries doivent être conçues par calculs ;
- Reprendre les charges latérales appliquées, vérifiés par calcul ;
- Fondées en pied : max 11m de haut, indice de risque sismique égal ou inférieur à 0,35 IEFaSa (0,2) annexe F de la norme CSA S304.
- Protection contre la corrosion ;
- La maçonnerie doit reposer sur un matériau incombustible ;
- Les cornières et attaches doivent être de matériaux identiques ou compatibles afin de réduire les risques de corrosion galvanique ;
- Ouvertures : cornières en acier à prévoir ;
- Linteau libre : ne doit pas être attaché à l'ossature bois mais supporté par la maçonnerie. La longueur d'appui dépend de la résistance à la compression du parement ; elle est d'au moins 90 mm.
- Des joints de dilatation verticaux sont nécessaires si le linteau est fixé à la structure ossature bois (Figure 10).
- Joint de dilatation horizontal (pour mouvement vertical) : Si le parement est supporté à chaque étage par une cornière d'acier, un joint de dilatation sous la cornière d'environ 12 mm est recommandé.

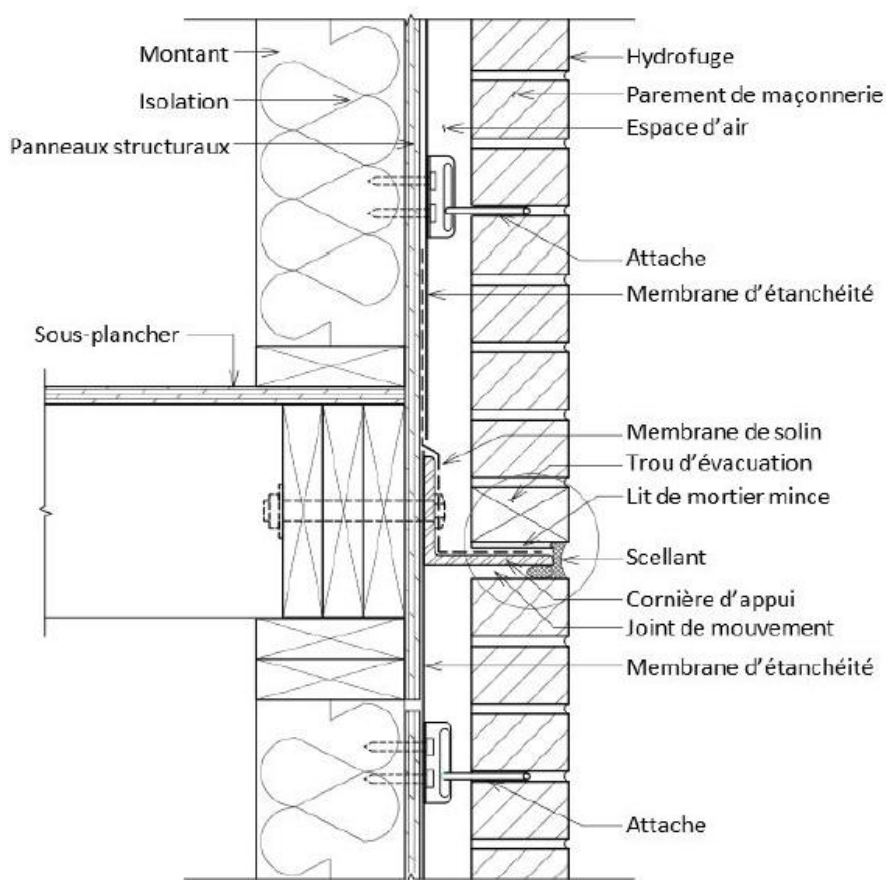


Figure 9 - Exemple de joint horizontal avec une cornière d'acier

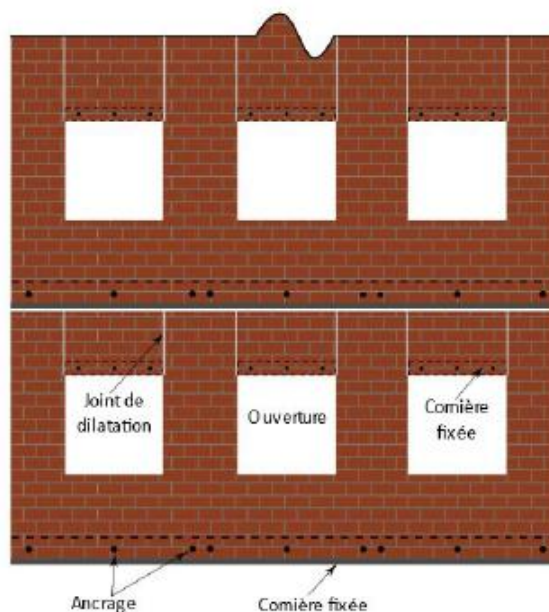


Figure 10 - Linteau intermédiaire fixé nécessitant des joints de dilatation

1.4.2.2. Etats-Unis

❖ Document 'Technical Notes on Brick Construction 44B-Wall Ties for Brick Masonry' [12] :

Le document Wall Ties for Brick Masonry fait l'inventaire des solutions de connexion dans le cadre de murs doubles impliquant de la maçonnerie. Les points suivants sont un résumé du contenu du document.

- Fonctions des attaches
 - Connection
 - Transfert de chargement latéral (les attaches doivent présenter une rigidité suffisante)
 - Permettre le mouvement dans le plan des deux murs (jeu mécanique)
- Différents types d'attaches
 - Attache simple ondulée recommandée pour les supports en structure bois
 - Attaches ajustables, par exemple attaches plates dans rail
- Critères de sélection
 - Rigidité suffisante pour transfert de charge latéral
 - Jeu mécanique pour permettre un mouvement différentiel
 - Résistance à la corrosion
 - Facilité/simplicité de mise en œuvre pour limiter les erreurs
 - Disponibilité et coût
 - Qualité des détails techniques et respect de la réglementation
- Recommandations
 - Limiter le jeu mécanique latéral à 1,6mm (1/16 inch)
 - Limiter l'excentricité dans les attaches ajustables
 - Éliminer les risques de décrochage en assurant des limitations verticales
 - Ajouter des attaches dans les 200mm autour des fenêtres, ou discontinuités
 - Ne pas utiliser de goutte d'eau, elles réduisent de manière importante (jusqu'à 50%) la résistance des attaches
 - Veiller au correct espacement des attaches : 3 ou 4 attaches /m² selon type d'attache, espacement maximal de 457 mm verticalement et 813 mm horizontalement, la lame d'air étant limitée à 25mm ou 114 mm selon type d'attaches.
 - Spécifier la raideur des attaches, déformation limitée à 1,2 mm (0,05 inch) pour une charge de 100 lb, essai de compression et tension axiale

- Type d’attaches adapté au système constructif en structure bois, uniquement des attaches ondulées, avec limitation de hauteur à 11,6m (38 ft).
- Assurer la résistance à la corrosion, les recommandations sur les revêtements :
 - Utilisation d’acier galvanisé ou
 - D’acier inoxydable (austénitique) ou
 - Revêtement époxy.

❖ Document ‘Technical notes on Brick Construction Brick veneer/wood stud [13]:

Le document “Brick veneer/wood stud” fourni certaines recommandations dans le cas particulier de l’association mur en brique et cadre en bois. Les recommandations sont résumées ci-dessous.

- Ouverture :
 - Cadre attaché à la structure en bois, avec une inclinaison de 15 degrés (environ 25 mm pour 100 mm) ;
 - Joint d’étanchéité : tout autour des fenêtres et portes, d’au moins 6mm ;
 - Ecart de 13 mm mini entre bas de la fenêtre et haut du rebord de fenêtre ;
- Attaches :
 - Acier à protéger de la corrosion : revêtement époxy, galvanisation ;
 - Attaches ondulées en acier (Corrugated sheet anchors) : 22 mm, meilleur retour avec les éléments plus épais et pré-tordu ;
 - Attaches filaires : W1.7 bout plié de 51 mm min ;
 - Attaches en plaque (sheet metal anchors).

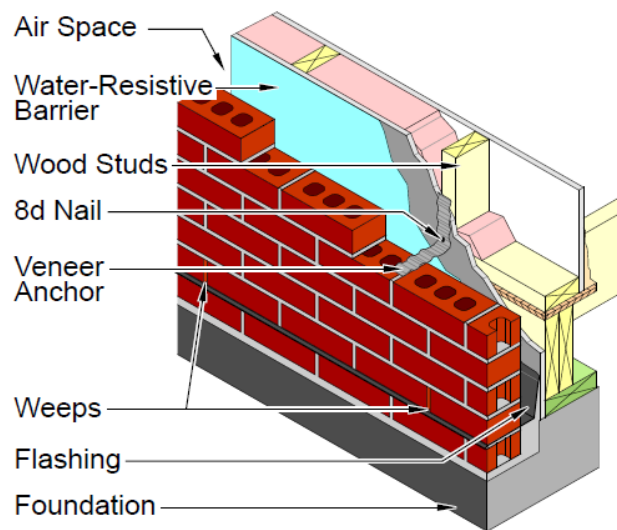


Figure 11 - Brick Veneer / Wood stud wall

- Fondations :
 - Des fondations en béton et en maçonnerie ou d'autres supports structurels incombustibles, tels que des cornières en acier, sont recommandées.
 - La conception des fondations doit tenir compte des tassements différentiels et de l'effet des charges concentrées. Un drainage approprié doit être assuré afin de maintenir la capacité portante du sol.
- Linteaux :

Les linteaux soutiennent la maçonnerie au-dessus des ouvertures en s'appuyant sur la maçonnerie de chaque côté de l'ouverture, plutôt que de se fixer à la structure du bâtiment, comme c'est le cas des cornières. Les linteaux peuvent être en maçonnerie de briques armées, en maçonnerie de béton armé ou en cornières d'acier. Les linteaux en acier, en pierre ou préfabriqués doivent reposer sur la maçonnerie d'au moins 102 mm de chaque côté de l'ouverture.

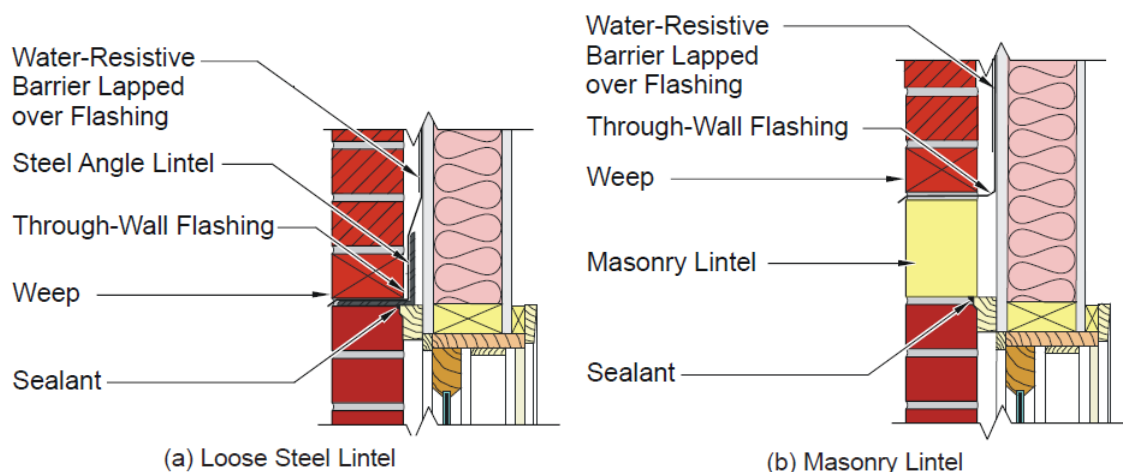


Figure 12 – Détails du linteau

Tableau 1 – Portée admissible du linteau

TABLE 2
Allowable Spans for Lintels Supporting Masonry Veneer

Size of Steel Angle, ^{2,3} in.	Steel Lintels ¹			Masonry Lintels ¹
	No Story Above	One Story Above	Two Stories Above	No. of ½ in. or Equivalent Reinforcing Bars in Reinforced Lintel ⁴
3 × 3 × ¼	6 ft-0 in.	4 ft-6 in.	3 ft-0 in.	1
4 × 3 × ¼	8 ft-0 in.	6 ft-0 in.	4 ft-6 in.	1
5 × 3½ × ⅝	10 ft-0 in.	8 ft-0 in.	6 ft-0 in.	2
6 × 3½ × ⅝	14 ft-0 in.	9 ft-6 in.	7 ft-0 in.	2

1. Either steel angle or reinforced lintel shall span opening.

2. Long leg of the angle shall be placed in a vertical position.

3. Steel members indicated are adequate typical examples; other steel members meeting structural design requirements may be used.

4. Depth of reinforced lintels shall not be less than 8 in., and all cells of hollow masonry lintels shall be grouted solid. Reinforcing bars shall extend not less than 8 in. into the support.

1.4.2.3. Belgique

L'article du CSTC-Contact 2017/4 [14] sur la « Liaison d'un parement maçonné à une ossature en bois » donne certaines règles visant à garantir une liaison durable entre le parement extérieur en maçonnerie et la structure porteuse en bois, notamment sur la mise en œuvre des systèmes de fixation. Voici un résumé des points préconisés par cet article :

- La présence d'une lame d'air ventilée est recommandée. Cette ventilation est assurée par des ouvertures disposées en haut et en bas du parement (joints verticaux ouverts ou briques d'aération).
- Le parement maçonné doit être liaisonné aux montants de l'ossature. Si ceux-ci sont trop fins ou s'il est difficile de savoir où placer les fixations en raison de la présence

d'une isolation complémentaire, il convient de fixer un panneau structural aux montants de l'ossature pour reprendre les efforts d'arrachement des attaches.

- La reprise d'importantes charges excentrées (reprise du linteau de parement de grande portée, par exemple) pourra nécessiter la conception d'une **paroi de type caisson** avec deux panneaux structuraux (intérieur et extérieur). La présence de panneaux structuraux en faces intérieure et extérieure est nécessaire pour éviter que les montants ne soient sollicités indépendamment les uns des autres par des efforts engendrés par le parement maçonné.

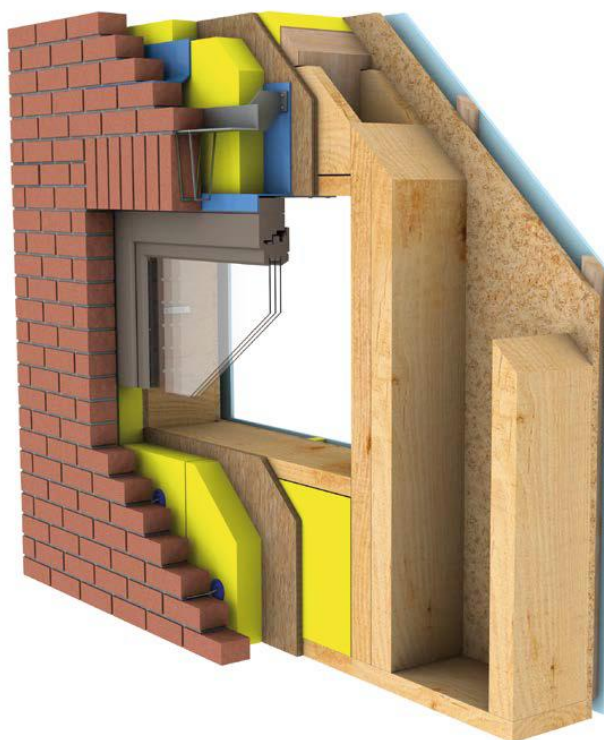


Figure 13 – Paroi de type caisson pour mur double en brique apparente sur COB (selon CSTC-Contact 2017/4)

- Concernant la mise en œuvre du parement maçonné, il convient tout d'abord de veiller à ce que l'arase des fondations offre un appui suffisamment large pour ménager une lame d'air de minimum 3 cm de profondeur entre la maçonnerie et le pare-pluie. Les briques reposent sur un solin de base qui doit partir de la face extérieure du mur, couvrir l'appui et remonter derrière le pare-pluie sur au moins 150 mm.
- La maçonnerie est fixée à l'ossature en bois au moyen d'attaches métalliques positionnées en (légère) pente vers le parement extérieur et/ou pourvues d'un système casse-goutte. Ces fixations, vissées à l'ossature et/ou aux panneaux portants et enrobées dans les joints de mortier de la maçonnerie, sont disposées à distance suffisante des baies, pieds de parois et autres singularités (minimum 150 mm), afin de ne pas percer les raccords des membranes d'étanchéité. Si les attaches sont fixées dans les montants (entraxe de 600 mm), la distance verticale à respecter sera de 350 mm. S'il est recommandé de poser les attaches en quinconce, il est toutefois nécessaire d'en placer au moins cinq par m².

1.4.3. Synthèse

1.4.3.1. Lamé d'air

Les préconisations de largeur de la lame d'air dans les documents étrangers et les ATEx varient entre 20 et 50 mm minimum, selon les sources. Des appréciations techniques d'expérimentations présentent des détails techniques avec lame d'air allant jusqu'à 50 mm.

Tableau 2 - Recommandations pour la taille de la lame d'air entre mur de parement en briques et ossature bois selon différentes sources (tableau non exhaustif)

Pays	Document de référence	Préconisations de largeur de la lame d'air
Belgique	Buildwise, <i>Liaison d'un parement maçonné à une ossature en bois</i> , 2017 [14]	≥ 30 mm
Canada	Code de la construction du Québec, 2015 [9]	≥ 25 mm
France	NF DTU 20.1 P1-1 : 2008 [1] 7.2.1 Paroi externe en maçonnerie 7.2.1.1 Dispositions constructives en partie courante et épaisseur minimale	≥ 25 mm
	NF DTU 20.1 P1-1 : 2020 [3] 5.12 Prescriptions particulières à certains types de murs 5.12.1.2.2 Cas où une lame d'air est nécessaire (murs de type IIb ou III)	≥ 20 mm ≥ 30 mm si pas d'isolant entre les deux parois du murs double
	NF DTU 41.2 : 2015 [15]	≥ 20 mm
USA	Brick Brief (MSJC Code) [16]	≥ 25 mm ≤ 114 mm 51 recommandé

1.4.3.2. Densité d'attaches

Les recommandations sur la densité d'attache varient entre 2 et 5 /m² selon les sources.

Tableau 3 - Recommandations du nombre d'attaches de liaison entre le mur de parement en briques et l'ossature bois selon différentes sources (tableau non exhaustif)

Pays	Document de référence	Nombre d'attaches minimum préconisé
Belgique	Buildwise, <i>Liaison d'un parement maçonné à une ossature en bois</i> , 2017 [14]	5 /m ²
Canada	Code de la construction du Québec, 2015 [9]	3 ou 4/m ²
France	DTU 20.1 P1-1 : 2008 [1] 7.2.1.2 Liaison à l'ossature porteuse	2 /m ² pour h ≤ 3 m 5 /m ² si h > 3 m
	DTU 20.1 P3 : 2020 [3] 7.5.6.2 Dispositions forfaitaires	Entre 2 /m ² pour h ≤ 6 m ou ≤ 2 étages et 5 /m ² si h > 8 m ou > 2 étages Selon dispositions et épaisseur de la paroi
	ATEx (voir §1.4.1)	5 /m ²
USA	Brick Brief (MSJC Code) [16]	4 /m ²

1.5. Etudes/Recherches existantes sur la liaison des murs doubles

Cette partie détaille les problématiques associées aux systèmes de murs doubles, notamment sur le rôle et les performances attendus des systèmes de liaisons.

Les attaches murales remplissent trois fonctions principales :

- **Assurer une liaison** entre la paroi de brique et son support ou une autre paroi de maçonnerie.
- **Transférer les charges latérales** avec un minimum de déformations.
- **Permettre des mouvements différentiels verticaux.**

En plus de ces fonctions, les attaches métalliques peuvent également renforcer la structure horizontalement ou longitudinalement, selon les besoins. Pour qu'un système d'attaches soit efficace, il doit répondre aux exigences suivantes :

- Être solidement fixé à la maçonnerie ou au parement de briques ainsi qu'à son support.
- Présenter une rigidité suffisante pour transférer les charges latérales avec des déformations minimales.
- Avoir un jeu mécanique réduit au minimum.
- Être résistant à la corrosion.
- Être simple à installer pour limiter les erreurs de pose et les dommages.

L'utilisation d'attaches métalliques dans la maçonnerie de briques remonte aux murs porteurs du XIX^e siècle, où leur conception reposait principalement sur des approches empiriques. Introduites en Angleterre au milieu des années 1800 avec des attaches en fer forgé, leur adoption s'est étendue aux États-Unis, où des tests ont révélé que les murs liés par des attaches métalliques étaient plus résistants à la pénétration de l'eau que ceux simplement en maçonnerie. Les attaches ont gagné en popularité avec l'abandon des murs massifs au profit de systèmes plus légers, comme les murs creux et les murs à double paroi. Cependant, cette évolution a également révélé des défis, notamment des ruptures fréquentes par cisaillement et une dépendance à des choix empiriques pour le dimensionnement et l'espacement. La variété des systèmes d'attaches et des matériaux disponibles complique encore leur sélection, tandis que certains produits, mal conçus, peinent à assurer un transfert de charge efficace. Bien que la plupart des systèmes soient fonctionnels, leur performance dépend d'une bonne compréhension des propriétés de la maçonnerie. Les exigences pour ces attaches, notamment en termes de type, taille et espacement, ont été progressivement standardisées dans le Code du bâtiment pour les structures de maçonnerie (ACI 530 / ASCE 5 / TMS 402-02 [17]), également connu sous le nom de code MSJC [16], qui fournit des directives claires pour leur utilisation.

Des chercheurs hollandais, Arslan et al. ont publié en 2021 des études sur les connexions entre les parois de murs doubles [18], [19]. Les murs doubles constituent aux Pays-Bas une pratique de construction répandue reconnue pour leur efficacité thermique et leur résistance aux intempéries. Aux Pays-Bas, un mur double typique comprend un mur porteur intérieur en maçonnerie de briques et un parement extérieur en brique, séparés par une lame d'air. Ces deux éléments sont reliés par des attaches métalliques.

L'étude d'Arslan et al. [18] résulte d'observations sur des bâtiments endommagés qui ont révélé leur vulnérabilité face aux ruptures hors plan lorsque les connexions entre les deux parois sont

insuffisantes. L'étude se concentre sur la proposition de modèles analytiques permettant d'évaluer les résistances mécaniques associées aux différents modes de ruine observés. L'étude se concentre exclusivement sur des attaches de type crochet-zigzag (ou attaches mortiers) scellées dans un joint de mortier de 10 mm d'épaisseur. Différentes résistances de mortier ont été étudiées, différentes épaisseurs de lame d'air ainsi que des longueurs d'ancrages variées. Cette étude a comparé les résultats analytiques avec ceux obtenus expérimentalement au travers d'essais élémentaires réalisés sur les attaches. L'étude ne s'est concentrée que sur le chargement axial (compression/traction) car les auteurs considèrent que la résistance au cisaillement de ce type d'attache est quasi-nulle. Aussi, les modes de ruine observés sont :

- En traction :
 - a. Rupture en traction de l'attache
 - b. Rupture de type cône dans le mortier (rupture associée à la liaison mortier/brique)
 - c. Glissement attache/mortier, rupture d'adhérence attache/mortier

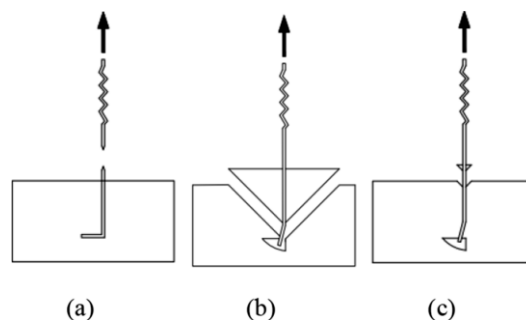


Figure 14 - modes de ruptures en traction [18]

- En compression :
 - a. Flambement de la tige
 - b. Glissement de la tige dans le mortier
 - c. Expulsion d'un cône de mortier

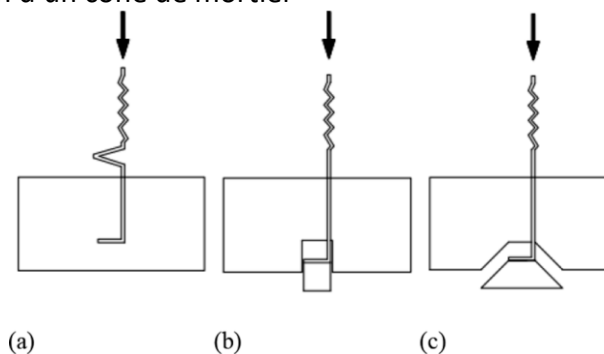


Figure 15 - Modes de rupture en compression [18]

Les auteurs proposent différents modèles analytiques pour évaluer les résistances associées à chacun de ces modes de rupture.

Il est intéressant de noter que les auteurs préconisent de considérer la résistance au flambement de la tige directement via l'application de la formule d'Euler avec une longueur de flambement de 0.5. De plus les auteurs considèrent que l'imperfection d'alignement des tiges n'affecte pas leurs résistances au flambement.

Cette étude montre que globalement les modes de ruine observés en traction sont généralement associés à la rupture par glissement de l'attache (interface attache/mortier). Tandis que les ruptures en compression sont généralement obtenues par le flambement des tiges.

Par la suite, Javier Ortega [20] a proposé un modèle numérique visant à analyser et comprendre le comportement mécanique des attaches métalliques reliant les murs en parement de brique (brick veneer walls) aux murs de remplissage en maçonnerie, notamment sous chargements horizontaux, tels que ceux induits par les séismes ou le vent. Le travail s'appuie sur les essais expérimentaux de tests cycliques de traction-compression réalisés sur des assemblages brique–mortier–attache, au cours desquels différents modes de rupture ont été observés : glissement de l'attache, fissuration du mortier et flambement de l'attache métallique.

1.6. Objectifs de l'étude

L'objectif principal du projet WOODSTONE est d'apporter les justifications techniques de faisabilité du système constructif de mur double maçonné sur COB. Pour cela, l'étude a porté sur 3 axes : une modélisation du comportement de l'assemblage brique-mortier-attache, une campagne d'essais à cette même échelle pour alimenter le modèle et valider les choix de matériaux pour ensuite mener une campagne d'essai à grande échelle, afin d'évaluer le système constructif dans des conditions proches de l'usage réel. Pour cette étude, il a également été décidé d'évaluer plusieurs solutions, en faisant varier les composants du système : type de brique (pleines ou perforées), type de montage (à joint épais ou semi épais), type d'attache (filare ou plate avec rail).

Afin d'alimenter les simulations numériques et de valider la compatibilité des éléments du complexe brique-mortier-attache, il a été nécessaire de caractériser par essais chaque élément du complexe, ainsi que le comportement aux interfaces du complexe. L'interface entre briques et mortier a été caractérisée par des essais de cisaillement sur des triplets de briques maçonnées. Le comportement des attaches dans le complexe a lui été caractérisé par des essais de traction et de compression des attaches montées entre deux briques maçonnées. Enfin, des essais complémentaires ont été réalisés pour étudier le détachement de l'attache plate du rail support.

La calibration du modèle éléments finis a été réalisée sur la base de ces essais élémentaires en termes de rigidité et de résistance. Une fois le modèle validé, celui-ci a été utilisé pour une analyse paramétrique afin d'évaluer l'influence de différents paramètres sur le comportement mécanique des deux types d'attaches étudiés en traction et compression.

Enfin, pour évaluer la stabilité et la conservation de l'étanchéité à l'eau du système, plusieurs essais ont été réalisés sur des maquettes à grande échelle, représentatives du système global. Tout d'abord, deux essais mécaniques ont été effectués : un essai de mise en parallélogramme et un essai de déplacement vertical différentiel. Ces essais ont été suivis d'un essai d'étanchéité à l'eau et de résistance au vent. Enfin, les maquettes ont été soumises à un essai mécanique simulant des conditions plus sévères, avec un déplacement vertical différentiel jusqu'à 30 mm, afin d'étudier le comportement du système sous forte sollicitation.

L'objectif de cette étude a été de fournir une base technique et scientifique solide pour élaborer un guide de prescriptions de solutions de conception et de mise en œuvre des systèmes de murs doubles en briques apparentes sur structures à ossature bois. Ce guide vise à permettre la réintégration de ce système de murs doubles sur COB en technique courante.

2. Domaine d'emploi

Le procédé de mur double maçonné sur ossature bois et CLT étudié dans ce rapport concerne les bâtiments ayant jusqu'à trois niveaux ($\leq R+2$) et de hauteur maximale 10m. Le mur maçonné est fondé en pied, il est autoportant et filant sur les trois niveaux. Ce mur est relié à la structure ossature bois ou CLT (avec les limites définies dans le §3.1) par des attaches (tiges anti-dévers) qui assurent sa stabilité vis à vis des sollicitations latérales et hors plan.

La paroi externe peut aussi reposer sur une console de supportage filante selon la catégorie A4 ou A5 au sens du DTU 20.1, en pied et à chaque niveau du bâtiment. Pour ce cas, un joint de dilatation horizontal filant en partie supérieure du parement d'un étage entre la dernière rangée et la sous-face de la cornière filante est nécessaire.

Au droit des baies, les cornières utilisées dans le mur maçonné ne sont reliées ni à l'ossature bois, ni à son encadrement de baie.

2.1. Sollicitations prises en compte

2.1.1. Charges verticales

Les charges verticales du bâtiment sont reprises par l'ossature bois conformément au NF DTU 31.2 [2]. Le mur en briques repose sur la dalle support et reprend ses charges verticales propres.

2.1.2. Charges horizontales

Le présent document est applicable aux bâtiments réalisés dans les zones climatiques françaises de plaine (conventionnellement caractérisées par une altitude inférieure ou égale à 900 m).

Les sollicitations dues au vent prises en compte dans cette étude correspondent aux sollicitations dans les zones de vent de 1 à 4, avec des rugosités de terrains de catégorie 0 à IV. Elles peuvent être calculées sur la base de l'Eurocode 1 (NF EN 1991-1-4 [21]).

Les dispositions techniques du présent document concernant la résistance à la pluie battante des murs doubles en briques sur ossature bois permettent de satisfaire à l'exigence Ee1 du NF DTU 31.2 [2]. De fait, la rugosité 0 est exclue, et certaines catégories de rugosité de la zone 4 (voir Tableau 4). Le tableau n'est reproduit que pour les hauteurs de plancher bas de dernier niveau inférieur à 8m, puisque le domaine d'emploi prévu par la présente étude ne prévoit pas de bâtiment plus haut avec cette technique (§2).

NOTE La technique « mur double » décrite dans le présent document ne permet de constituer un revêtement extérieur à joints fermés au sens du NF DTU 31.2. Le système ne peut donc pas être compatible avec une exigence de résistance à la pluie battante de type Ee2

Tableau 4 : Exigence de résistance à la pénétration de la pluie battante – selon le §8 du NF DTU 31.2 P1-1 [2]

Région de vent ^a	Catégorie de rugosité du terrain ^a	Solution mur double
1	IV	Admise ^b
	IIIb	Admise ^b
	IIIa	Admise ^b
	II	Admise ^b
	0	Exclue
2	IV	Admise ^b
	IIIb	Admise ^b
	IIIa	Admise ^b
	II	Admise ^b
	0	Exclue
3	IV	Admise ^b
	IIIb	Admise ^b
	IIIa	Admise ^b
	II	Admise ^b
	0	Exclue
4	IV	Admise ^b
	IIIb	Admise ^b
	IIIa	Exclue
	II	Exclue
	0	Exclue
^a Définies conformément à NF EN 1991-1-4 et ses annexes nationales		
^b Dans la limite des 10 m de hauteur maximale		

2.2. Autres sollicitations

2.2.1. Séisme

Le comportement au séisme des murs double n'a pas été étudié dans ce projet.

Dans ce cadre, l'étude se limite au cas où la catégorie d'importance du bâtiment et / ou la zone de sismicité (voir Figure 16 et Tableau 5) n'entraînent pas d'obligation de dimensionnement de l'ouvrage au séisme (voir Tableau 6).

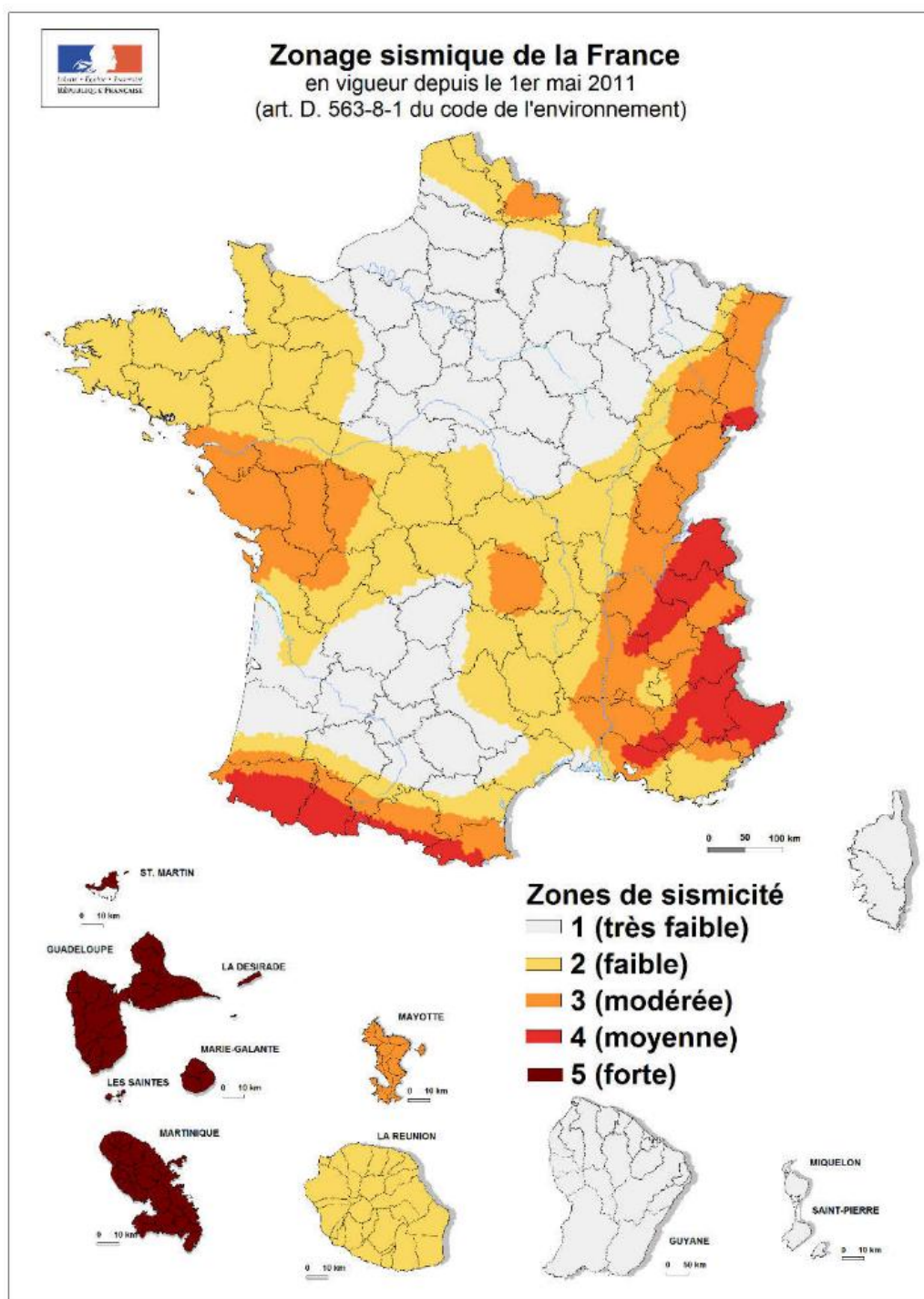


Figure 16 – Carte du zonage sismique de la France

Tableau 5 : Catégories d'importance des bâtiments [22]

Catégorie d'importance	Description
I	Bâtiments dans lesquels il n'y a aucune activité humaine nécessitant un séjour de longue durée
II	Habitations individuelles, ERP de catégories 4 et 5, habitations collectives de hauteur inférieure à 28m, bureaux ou établissements commerciaux non ERP de hauteur inférieure ou égale à 28m et maximum 300 personnes, bâtiments industriels pouvant accueillir au plus 300 personnes. Parcs de stationnement ouverts au public.
III	ERP de catégories 1, 2 et 3, habitations collectives et bureaux de hauteur strictement supérieure à 28m, bâtiments pouvant accueillir plus de 300 personnes, établissement sanitaires et sociaux, centres de production collective d'énergie, établissements scolaires.
IV	Bâtiments indispensables à la sécurité civile, la défense nationale et le maintien de l'ordre public. Bâtiment assurant le maintien des communications, la production et le stockage d'eau potable, la distribution publique de l'énergie. Bâtiment assurant le contrôle de la sécurité aérienne. Etablissements de santé nécessaire à la gestion de crise, centres météorologiques.

Tableau 6 : Domaine d'application de l'Eurocode 8 [23]

Zone de sismicité	Catégorie d'importance			
	I	II	III	IV
1	<div style="border: 1px solid black; padding: 10px; text-align: center;"> Obligations réglementaires </div>			
2				
3				
4				
5				
	Pas d'obligation			

2.2.2. Sécurité incendie

Le domaine d'emploi étudié dans ce projet étant le suivant :

- ERP et ERT avec plancher bas du dernier niveau <8m
- Bâtiments d'habitation de 1^{ère} et 2^{ème} famille, ≤R+3,

Il n'est **pas soumis à des exigences réglementaires particulières**. La propagation du feu par les façades est prise en compte conformément aux préconisations de l'**Instruction Technique 249** [24].

3. Description du procédé constructif

Le système constructif de mur-double étudié est repris dans les Figure 17 à Figure 19 ci-après :

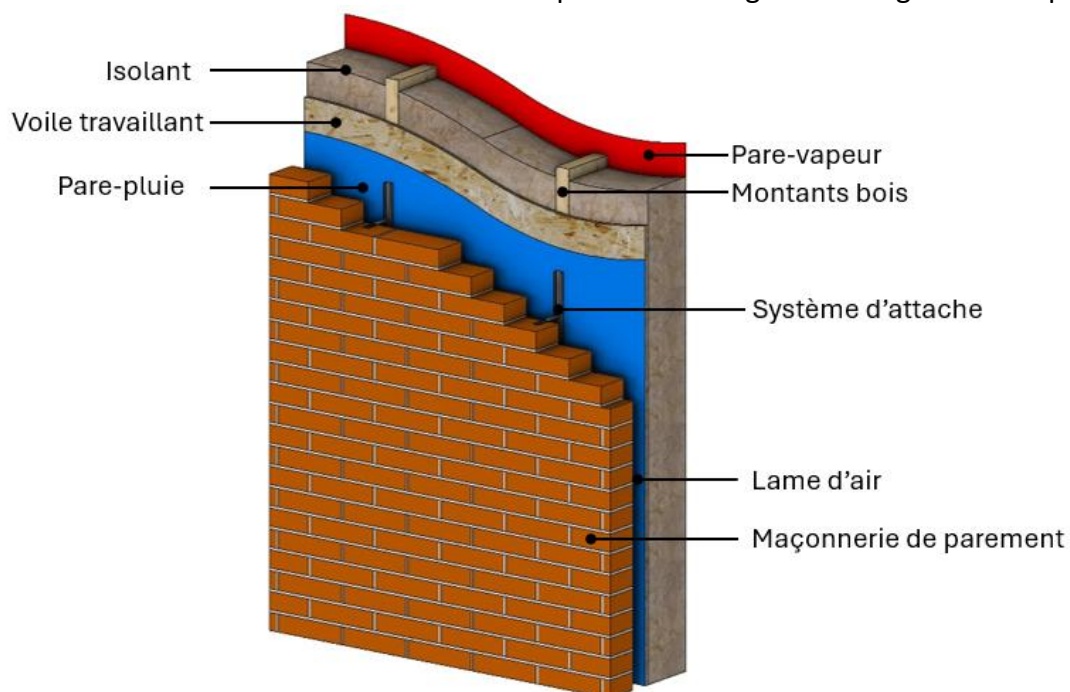


Figure 17 - Schéma de principe d'un mur-double maçonné sur ossature bois

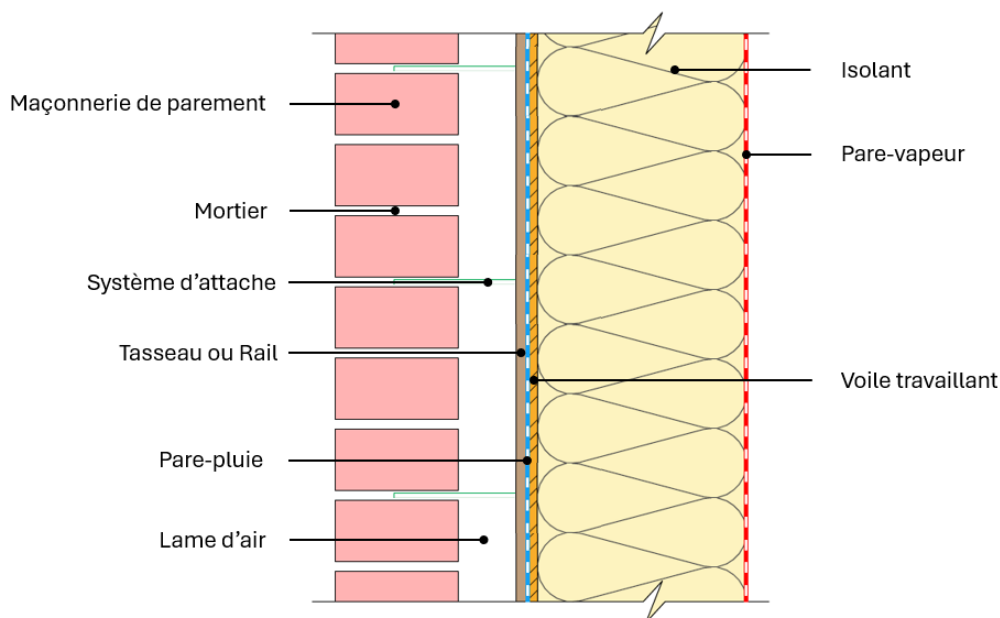


Figure 18 - Coupe verticale d'un mur double maçonné sur ossature bois

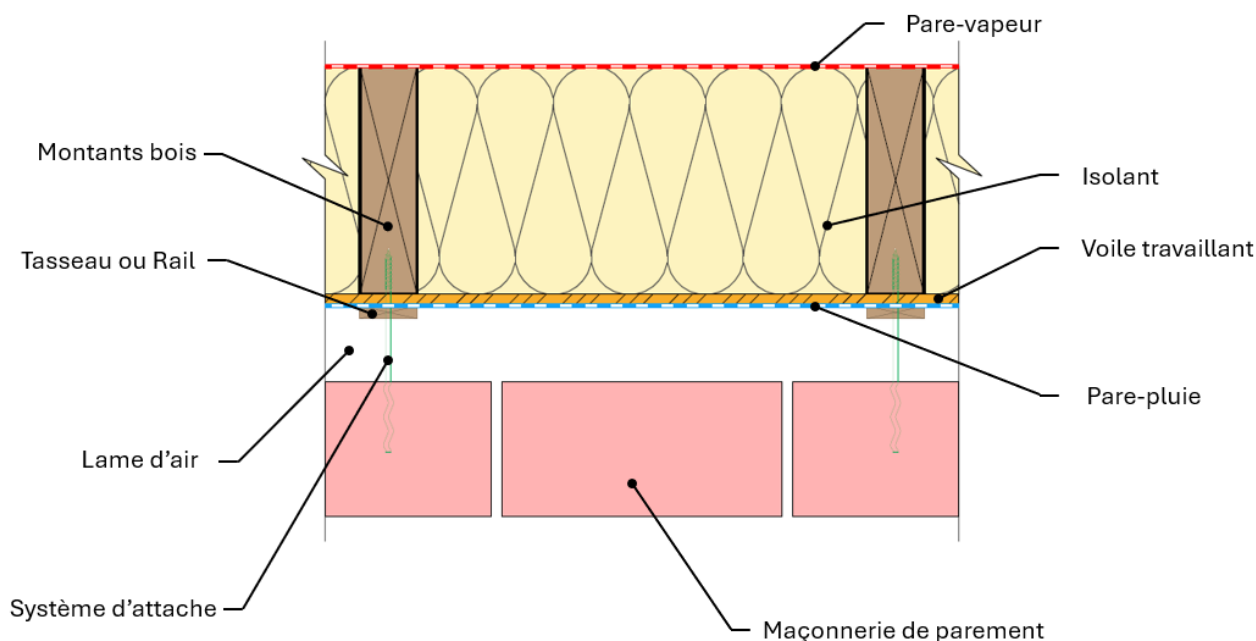


Figure 19 - Coupe horizontale d'un mur double maçonné sur ossature bois

3.1. Support bois

La composition du mur à ossature bois est conforme au NF DTU 31.2 [2].

Les murs en CLT sont également couverts par ce document sous les conditions suivantes :

- L'isolant doit se trouver côté intérieur
- Les attaches qui font la liaison entre le mur maçonné et le CLT doivent avoir un entraxe au maximum de 645 mm en horizontal.

3.2. Maçonnerie

Les ouvrages en maçonnerie de petits éléments sont mis en œuvre conformément à la norme NF DTU 20.1 [3]. La version en vigueur de la NF DTU 20.1 n'inclue pas les systèmes de murs doubles sur ossature bois, les dispositions pour la partie maçonnerie extérieure du mur double peuvent cependant être appliquées.

3.2.1. Briques

Les briques utilisées pour les murs doubles sont des briques de **type U** (destinées à être utilisées pour les maçonneries **non-protégées**), de forme parallélépipédique, fabriquées à partir de terres argileuses cuites. Les briques pleines, dite briques massives, les briques avec renforcement, et les briques à perforations verticales sont adaptées à ce procédé (voir Figure 20). Leur masse varie généralement de 1,8 à 2,5 kg. De la matière première utilisée et des conditions de fabrication (cuisson, atmosphère de cuisson, ...) résulte **une grande diversité de couleur et d'aspect de surface** : briques moulées main, extrudées, sablées, flamées, ou émaillées.

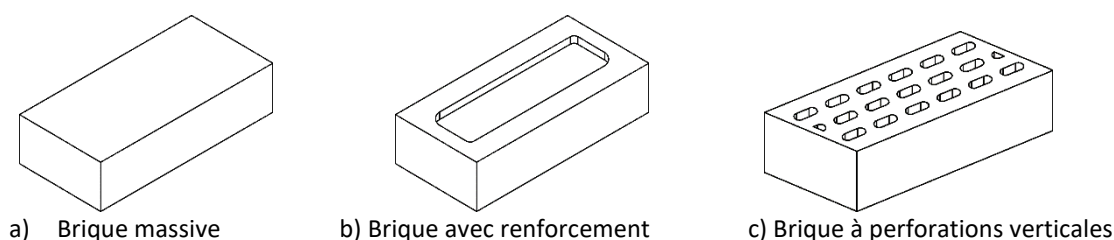


Figure 20 – Exemple de briques utilisées en mur double

Les briques utilisées dans les montages traités par ce projet suivent les spécifications de la norme NF EN 771-1+A1 [5] et font l'objet d'un marquage CE selon le Règlement (UE) n°305/2011.

Les dimensions communément utilisées de ces briques sont présentées dans le Tableau 7, non-exhaustif, ci-dessous.

Tableau 7 - Dimensions standard de briques (Tableau non-exhaustif)

Type	Longueur L (mm)	Largeur l (mm)	Hauteur H (mm)
Briques pleines ou perforées de taille standard	210	100	50
	220	105	40
	220	105	50
	220	105	55
	220	105	60
	220	105	70
	250	120	65

Outre leurs caractéristiques d'aspect (couleur, texture de surface), les briques utilisées sont choisies sur la base de critères de **résistance mécanique** (notamment la résistance à la compression), et de **durabilité**. Cette dernière est évaluée par la **tenue aux cycles de gel/dégel** des briques, sur la base des normes NF EN 772-22 : 2018 [25] (essai de type initial) et NF EN 771-1/CN [5] (essais de suivi). Utilisées sans protection à l'extérieur, et selon les conditions climatiques de la zone où se situe l'ouvrage, les briques choisies doivent généralement satisfaire à la catégorie d'exposition **F2 (exposition sévère)**, cette caractéristique étant déclarée dans le cadre du marquage CE des briques.

Les propriétés d'absorption d'eau, mesurés par le **taux initial d'absorption d'eau**, et la **dilatation due à l'humidité** sont également des caractéristiques importantes à prendre en compte dans le choix des briques.

3.2.2. Mortiers de montage

Les mortiers doivent garantir une bonne liaison entre les éléments de maçonnerie ; ils présentent **un niveau de résistance** et **une adhérence aux éléments de maçonnerie** compatibles avec l'utilisation. **Leur durabilité** doit être considérée sur la base des classes d'exposition de l'ouvrage à réaliser, conformément aux recommandations du DTU 20.1 [1] et de l'Eurocode 6 [26].

Les mortiers considérés dans ce guide sont conformes à la norme NF EN 998-2 : 2016 [27]. Ils sont du type G (mortiers à usage courant), et peuvent être :

- De recette, c'est à dire fabriqués sur chantier ou en usine en suivant une composition définie. Ces mortiers sont utilisés pour le montage à joint épais.
- Performanciels, fabriqués industriellement pour satisfaire une performance déclarée.

L'annexe A1 présente une sélection des mortiers de montage dédiées aux maçonneries ainsi que les principales propriétés déclarées par leurs fabricants.

Dans le cadre de ce projet, on utilise des mortiers de catégories M 10 au minimum ou M 15 (Tableau 8).

Tableau 8 - Résistances à la compression des mortiers de catégories M 10 et M 15 (NF EN 998-2)[27]

Catégorie	M 10	M 15
Résistance en compression (N/mm ²)	10	15

3.2.3. Joints de montage

Le type de joint est choisi en fonction de critères d'aspect, essentiellement. Sont pris en compte **le type de brique** à utiliser (couleur, tolérances dimensionnelles, etc.), **les types d'environnements**, et **les conditions de réalisation** de l'ouvrage.

Les joints ont un impact non-négligeable sur **l'aspect de l'ouvrage**, c'est pourquoi les critères **de couleur** et **de tolérances dimensionnelles**, et **la susceptibilité de relargage d'efflorescences**, ont un poids important au niveau du choix.

Il existe une grande diversité de montages de mur double. **L'appareillage en demi-brique** est le plus courant, mais d'autres appareillages sont possibles. La taille du joint peut également constituer un élément technique et esthétique.

Les techniques de hourdage considérées dans ce guide utilisent l'un des types de joints suivants :

- Joints épais, continus et entièrement remplis, d'une épaisseur comprise entre 10 et 20 mm, NF DTU 20.1 P1-2 [1] ;
- Joint semi-épais, appliqué à l'aide d'une poche à douille – joints d'une épaisseur comprise entre 3 et 10 mm.

Conformément au paragraphe §5.5.1.1 de la NF DTU 20.1 P1-1 [1], « *quel que soit le type de mur et la nature de la maçonnerie, le profil des joints des maçonnerie apparentes à l'extérieur ne doit pas s'opposer à l'écoulement des eaux de ruissellement.* »

Pour la mise en œuvre, l'humidification des éléments de maçonnerie au moment du montage peut varier selon les conditions climatiques au moment du montage, ou si les éléments de maçonnerie ont une absorption d'eau élevée.

3.3. Consoles et linteaux

La console de supportage est un accessoire métallique destiné à supporter le poids des maçonneries de parement. Les consoles de supportage peuvent être disposées en pied de mur, en abouts de plancher ou servir de poutres-linteaux. On peut aussi utiliser des cornières métalliques comme poutres-linteaux si les dimensions des ouvertures le permettent.

Le choix d'un type de console de supportage dépend des charges à reprendre, du type de maçonnerie à monter, et de la nature du mur support. Leur résistance mécanique doit être adaptée aux sollicitations.

Pour la console de supportage, il est nécessaire de privilégier les abouts de planchers ou de dalles pour l'ancrage des dispositifs de fixation de la console.

Dans le cadre de ce projet, le mur de parement en maçonnerie peut être fondé en pied sur fondation en béton armé et est autoportant et filant sur un, deux ou trois niveaux.

La paroi externe peut aussi poser sur une console de supportage filante selon la catégorie A4 ou A5 au sens du DTU 20.1, en pied et à chaque niveau du bâtiment. Dans ce cas, un joint de dilatation horizontal filant en partie supérieure du parement d'un étage entre la dernière rangée et la sous-face de la cornière filante d'au moins 10 mm est nécessaire pour autoriser le mouvement vertical (cf. selon le paragraphe 0).

Dans notre étude, le linteau est libre, c'est-à-dire qu'il n'est pas attaché à l'ossature en bois mais intégré directement dans la maçonnerie, la longueur d'appui dépend de la résistance à la compression du parement et est au moins 90 mm.

Le linteau peut être fixé à la structure à ossature en bois. Dans ce cas, des joints de dilatation verticaux sont nécessaires. Des consoles avec des trous oblongs permettant le libre déplacement horizontal des briques de parement peuvent aussi être utilisées. Les linteaux peuvent être en béton armé, et désolidarisés de la structure porteuse.

3.4. Assemblage entre ossature bois et maçonnerie

3.4.1. Attaches

Il existe une grande variété d'attaches (tiges anti-dévers) pour les murs doubles (Figure 21). Les attaches évoquées dans ce guide sont conformes à la norme NF EN 845-1+A1 [28]. Les attaches sont choisies en fonction du mode de fixation ou d'ancrage aux parois, de la largeur du vide traversé par l'attache (lame d'air et éventuel isolant), et de la classe d'exposition selon le tableau 10 de la NF DTU 20.1 P 1-2 [1] afin d'assurer la protection contre la corrosion.

Dans la version de 2008 du DTU 20.1 P 1-2 [1], une note du paragraphe 7.2.1.2 fait mention d'attaches *“en plats d'acier galvanisé de petites épaisseurs cloués dans les poteaux d'ossature par des clous galvanisés torsadés”* souvent utilisées.



Figure 21 - Variétés de type d'attaches adaptés aux murs doubles de maçonnerie de briques sur ossature bois

Les attaches de liaison sont noyées dans les joints de mortier horizontaux du mur de parement d'une part et fixés dans les montants d'ossature bois d'autre part. Elles comportent un dispositif de maintien à leur extrémité (retour d'équerre de 50 mm environ, ondulations, stries...) afin d'assurer un ancrage suffisant dans la maçonnerie de parement.

Les attaches pour maçonnerie sur ossature bois doivent satisfaire à des critères particuliers, en prenant en compte les mouvements entre la maçonnerie et l'ossature en bois liés aux déformations différentielles, la dilatation due à l'humidité, entre autres. Une grande diversité de systèmes d'attaches existe ; certains sont limités à un mouvement maximal de 24 mm, d'autres permettent un déplacement différentiel allant jusqu'à 65 mm (voir Annexe A1). Ces spécificités seront élaborées dans la partie 4.

Certains fabricants d'attaches préconisent des résistances minimales pour les mortiers, les briques et la classe de résistances des bois auxquels ils sont associés.

Les attaches doivent être inclinées vers le bas, côté extérieur, ou être munies d'un dispositif anti-goutte d'eau pour drainer l'eau infiltrée ou l'eau de condensation vers le mur de parement ou dans la lame d'air.

L'annexe A1 présente une sélection de système d'attaches dédiées aux maçonneries sur ossature en bois ainsi que les principales propriétés déclarées par leurs fabricants.

Les attaches, ou tiges anti-dévers, sont positionnées dans le mortier de hourdage des briques au fur et à mesure du montage. La surface de contact de l'attache avec le mortier joue un rôle dans l'adhérence, mais la forme de l'extrémité de l'attache peut également exercer une influence importante sur les performances mécanique finales obtenues.

3.4.2. Implantation des attaches

Un dispositif spécifique est nécessaire pour assurer la continuité du pare-pluie.

Deux solutions peuvent être appliquées :

- un tasseau de section minimale 15x45 mm² fixé dans les montants d'ossature. L'attache se fixe dans les montants d'ossature en bois à travers le tasseau.
- un rail métallique continu fixé dans les montants d'ossature. L'attache entre mur maçonné et ossature en bois vient se loger dans le rail métallique.

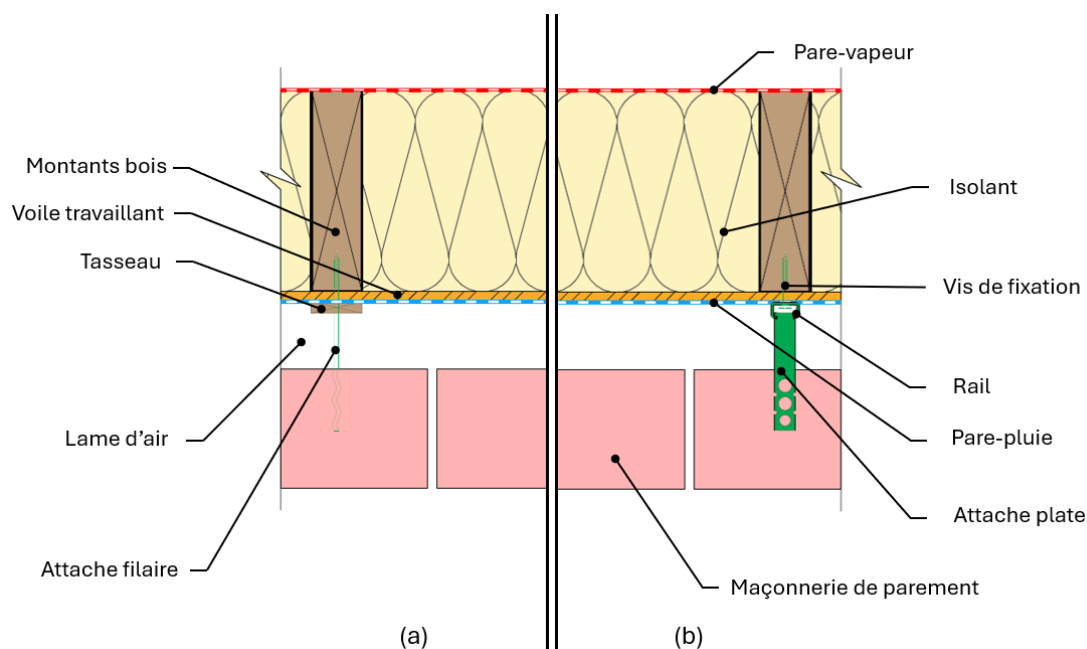


Figure 22 - Solution attache filaire + tasseaux (a) et attache plate + rail + vis (b)

3.5. Protection vis-à-vis des intempéries

L'étanchéité à l'eau est assurée par trois éléments :

- **La maçonnerie de briques apparentes** du système protège le mur de l'exposition directe à la pluie battante [29]
- La **lame d'air**. La maçonnerie n'étant pas totalement étanche à l'eau, de l'eau liquide peut s'infiltrer dans la lame d'air. Il est donc important de prévoir l'évacuation de cette eau en pied de lame d'air, et à chaque interruption horizontale de la lame d'air, au niveau des linteaux de fenêtre, ou autres ouvertures.
- Le **pare-pluie** disposé à l'extérieur de l'ossature bois.

3.5.1. Lamé d'air

3.5.1.1. Partie courante

Le système « mur double » est constitué d'une lame d'air ventilée, c'est à dire d'un vide, ventilé sur l'extérieur, ménagé entre la paroi en briques de parement et l'ossature en bois. Sa fonction principale est de créer une rupture capillaire et d'évacuer l'eau éventuellement infiltrée. Elle peut également jouer un rôle de chambre de décompression et d'amélioration thermique. Enfin, elle garantit les performances hygrothermiques et la salubrité de l'ossature bois.

Les préconisations du NF DTU 20.1 [1] pour les murs doubles dont la paroi interne est en maçonnerie ou en béton sont de laisser des joints verticaux non garnis tous les mètres environ, sur 5 cm de hauteur minimum dans la première assise de la maçonnerie (NF DTU 20.1 P1-1 : 2020 [3], §6.3.5.2 qui renvoi au §5.12.1.1), et sur 5 cm de hauteur dans la dernière rangée de la maçonnerie pour assurer le débit de la lame d'air.

Les dispositions du NF DTU 41.2 [15] peuvent être reprises pour la technique du mur-double maçonné sur ossature en bois afin d'assurer la salubrité de l'ossature bois selon NF DTU 31.2 [2].

Pour que la lame d'air soit suffisamment ventilée, il faut éviter les pertes de charges en prévoyant :

- Une épaisseur de la lame d'air au moins égale à 20 mm. Cette épaisseur ne doit pas être réduite même localement sur tout plan vertical ;
- Des entrées et sorties de ventilation de sections dimensionnées comme indiqué ci-dessous :
 - 50 cm²/ml de largeur de mur maçonné pour une hauteur au plus égale à 3m ;
 - 65 cm²/ml de largeur de mur maçonné pour une hauteur de 3m à 6m ;
 - 80 cm²/ml de largeur de mur maçonné pour une hauteur de 6m à 10m ;
- Des dispositifs peuvent être mis en place pour augmenter la ventilation (exemple en Figure 23).

Pour assurer les débits mentionnés ci-dessus, il est nécessaire de prévoir des joints non garnis, des grilles d'aération ou des briques perforées et de calculer les débits.

Des exemples sont donnés dans le Tableau 9 sur le nombre de rangées de briques minimales à prévoir en joints non garnis afin d'assurer les débits minima exprimés plus haut, pour deux briques différentes et une épaisseur de joint vertical de 1cm (sur la base que tous les joints sont non garnis).

Tableau 9 : Exemples de nombre de rangées de joints non garnis minimum à prévoir pour deux types de briques, une épaisseur de joint vertical de 1cm et en fonction de la hauteur de mur visée pour assurer une ventilation suffisante

Epaisseur de joint mm	H _{brique} mm	L _{brique} mm	Nombre de rangées de joints non garnis minimum		
			H ≤ 3m	3m ≤ H ≤ 6m	6m ≤ H ≤ 10m
10	50	215	3	3	4
	65	220	2	3	3

D'autres dispositifs tels que des grilles ou briques perforées dans le sens orthogonal au mur à la place d'une ou plusieurs briques peuvent être mis en place.

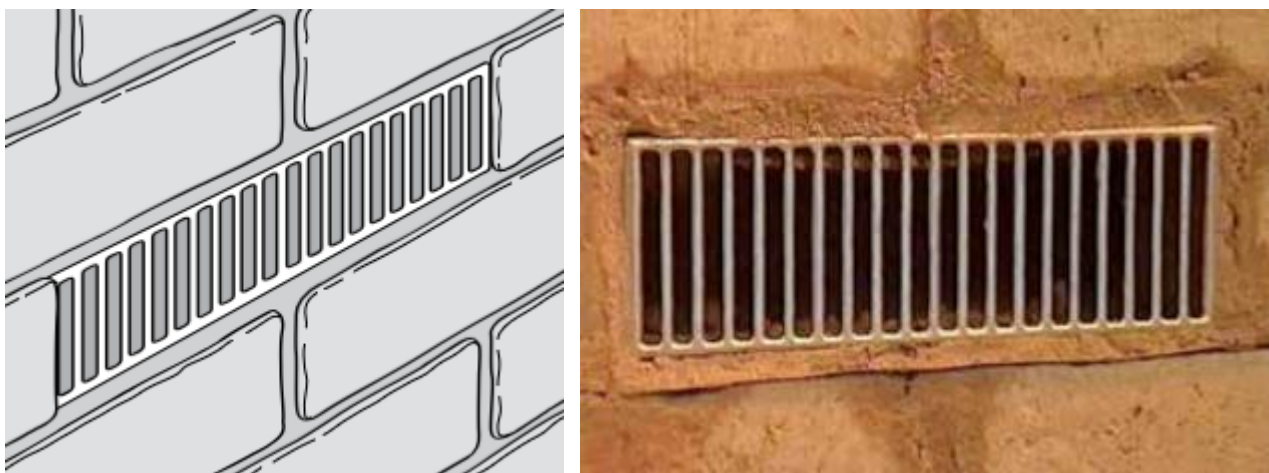


Figure 23 - Exemple de procédé avec grilles pour assurer un débit d'air suffisant [30]



Figure 24 : Exemple de procédé avec briques perforées pour assurer un débit d'air suffisant [Images de Shutterstock]

Des exemples sont donnés dans le Tableau 10 sur le nombre de grilles par mètre linéaire à prévoir afin d'assurer les débits minima exprimés plus haut, pour deux briques différentes :

Tableau 10 : Exemples de nombre de grilles minimales à prévoir pour deux types de briques en fonction de la hauteur de mur visée pour assurer une ventilation suffisante

Epaisseur de joint mm	H _{brique} mm	L _{brique} mm	1 grille toutes les ... briques a minima		
			H ≤ 3m	3m ≤ H ≤ 6m	6m ≤ H ≤ 10m
≥ 6	50	215	10	7	6
	65	220	13	10	8

Afin d'assurer une bonne ventilation le long de la paroi, il est nécessaire de disposer les grilles d'aération basses et hautes en quinconces comme sur la Figure 25.

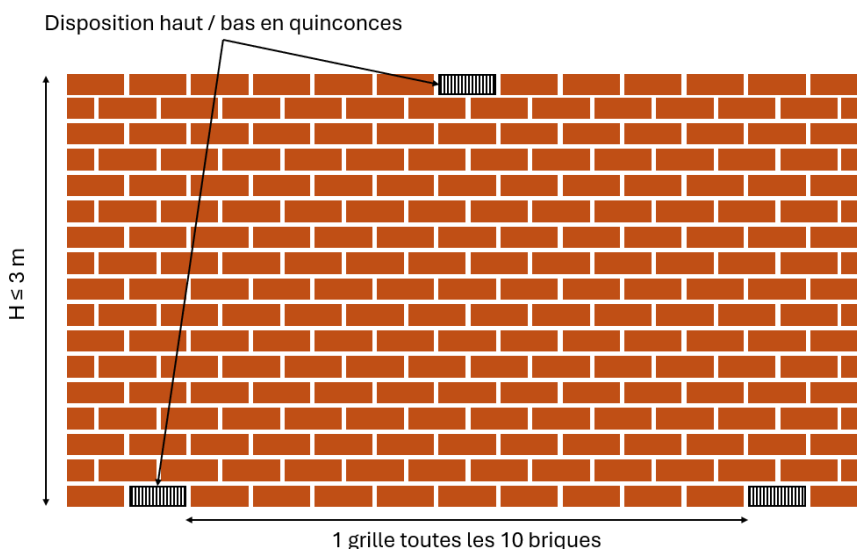


Figure 25 - Schéma d'implantation des grilles d'aération en quinconces

Il conviendra, quelle que soit la solution retenue, de s'assurer de la tenue mécanique de ces rangées de briques le cas échéant.

Si les débits calculés sont inférieurs à ceux mentionnés plus haut, il conviendra de réaliser une étude hygrothermique particulière pour assurer les performances de la paroi à ossature en bois. Cette étude sera réalisée en respectant les prescriptions du Guide « SimHuBat » [31]

Afin de permettre à la lame d'air de jouer son rôle dans l'étanchéité du système constructif, et ce quelle que soit la solution de ventilation retenue, l'eau liquide doit pouvoir s'écouler et être évacuée par les solins et les chantepleures (joints verticaux non garnis). Pour cela, plusieurs solutions sont envisageables.

Tout d'abord apporter un soin particulier lors de la réalisation de la maçonnerie, en réduisant l'épaisseur du lit de mortier du côté intérieur

Ensuite des dispositifs particuliers peuvent être utilisés : placés entre les deux parois ils assurent que même si du mortier tombe, l'eau pourra s'écouler. Un exemple de ce type de dispositif est illustré ci-dessous.

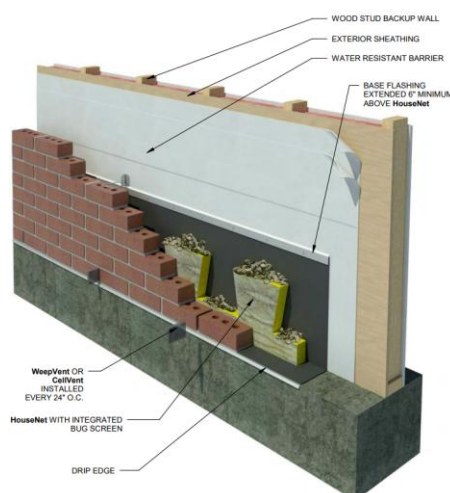


Figure 26 - Exemple de procédé avec de retenu du mortier permettant l'écoulement d'eau et la ventilation de la lame d'air

3.5.1.2. Pied de mur

La ventilation de la lame d'air et l'évacuation de l'eau éventuellement infiltrée est réalisée en laissant des joints verticaux non garnis ou en disposant une grille d'aération au niveau des premiers rangs de briques, comme indiqué au §3.5.1.1.

Selon le NF DTU 20.1 P1-1 [1], dans le cas de maçonneries non enduites, un joint vertical est laissé non garni tous les mètres environ dans la première assise de la maçonnerie, sur une hauteur de 5 cm au moins.

Cette disposition ne permet pas d'assurer une ventilation suffisante comme mentionné au §3.5.1.1. Il conviendrait donc soit :

- de réaliser tous les joints non garnis sur une hauteur donnée pour assurer les débits minimums du §3.5.1.1
- de réaliser une étude hygrothermique permettant de vérifier que les performances de la parois ossature bois sont toujours atteintes avec un débit inférieur (défini au préalable).

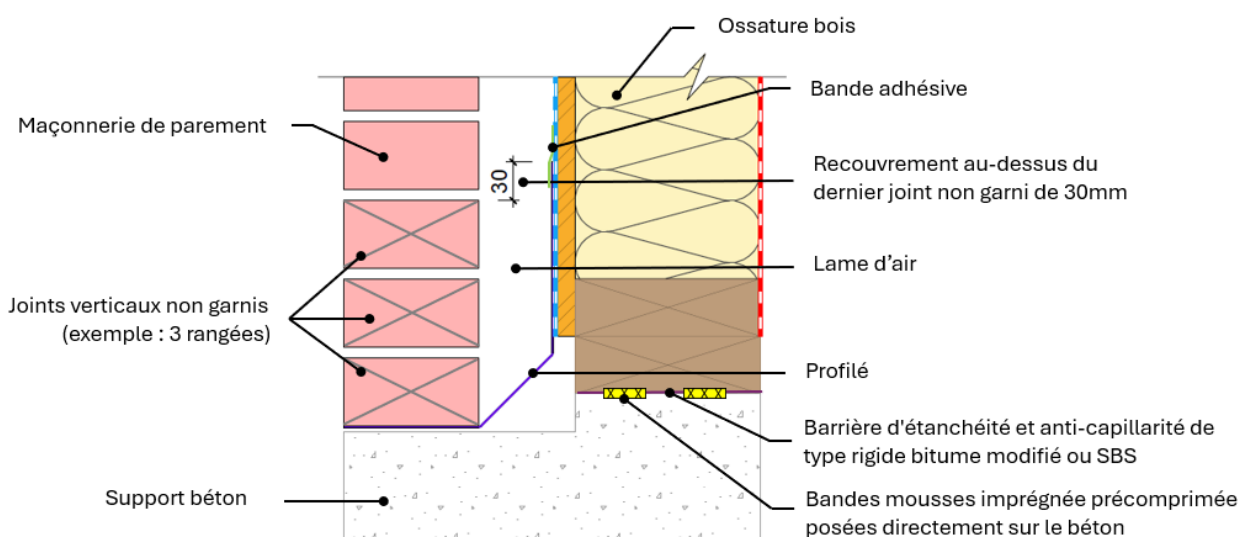


Figure 27 - Traitement en pied de mur avec joints non garnis

La disposition d'une grille d'aération permet d'assurer les débits et de gérer le pied de mur comme expliqué en Figure 28 :

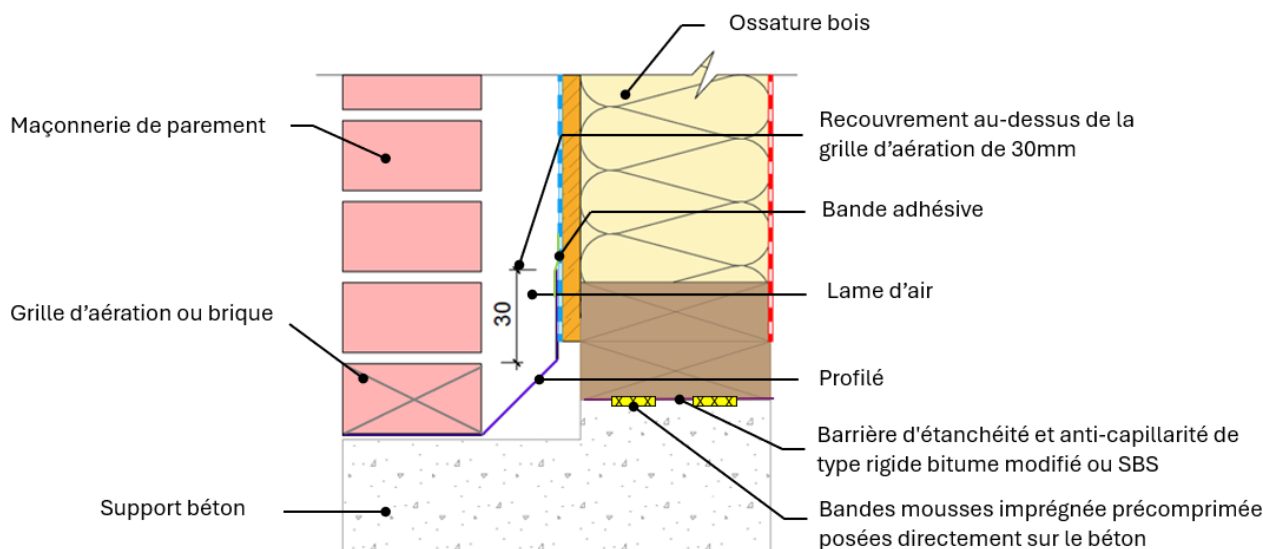


Figure 28:- Traitement en pied de mur avec grille d'aération

Un profilé métallique doit être mis en œuvre afin de permettre l'évacuation des eaux éventuelles vers l'extérieur de la paroi. Ce profilé doit remonter de 30 mm au moins au-dessus du dernier joint non garni et/ou de la dernière grille d'aération (voir Figure 27).

3.5.1.3. Partie haute

La ventilation de la lame d'air est réalisée, comme en partie basse, en laissant des joints verticaux non garnis ou en aménageant des grilles d'aération en partie haute.

Lors de recoupements, un jeu de 10 mm minimum est aménagé pour assurer la bonne ventilation de la lame d'air (voir schémas dans le §3.6).

3.5.2. Pare-pluie

Le pare-pluie assure un rôle de protection temporaire en phase chantier, il complète également l'étanchéité à l'eau (avec le parement et la lame d'air).

La mise en œuvre du pare-pluie sur murs à ossature en bois est décrite dans le NF DTU 31.2. Afin de garantir sa fonction, les tasseaux ou rails fixés dans les montants d'ossature bois assurant la liaison entre ossature bois et mur maçonné doivent être continus ou rendus continus par raboutage ou éclissage.

Si les attaches sont plates, elles comportent un casse-goutte facilitant l'évacuation de l'eau et empêchant son accumulation du côté du pare-pluie.

Pour les attaches cylindriques, une rondelle anti-goutte est mise en place.

3.6. Réalisation des encadrements de baies

La réalisation des encadrements de baie doit reprendre les dispositions du §15 du NF DTU 31.2 [2].

Les murs-doubles maçonnés sur ossature bois doivent respecter les exigences particulières suivantes :

- Les pièces d'encadrement dans le cadre de cette étude sont en métal.
- La bavette métallique de capotage d'appui doit présenter une pente minimale de 10 %.
- Lors de recouvrements, un jeu de 10mm minimum est aménagé entre les éléments d'encadrement et la maçonnerie pour assurer la bonne ventilation de la lame d'air (Figure 29 et Figure 30).
- Un recouvrement de 30mm minimum est nécessaire :
 - pour le larmier au-dessus de la cornière d'appui (Figure 29)
 - pour la bavette d'appui devant le mur maçonné (Figure 30)
 - pour les jambages devant le mur maçonné (Figure 31)

Le respect des prescriptions ci-dessus permet à la baie d'être compatible avec l'exigence Ee1 concernant la résistance à la pluie battante.

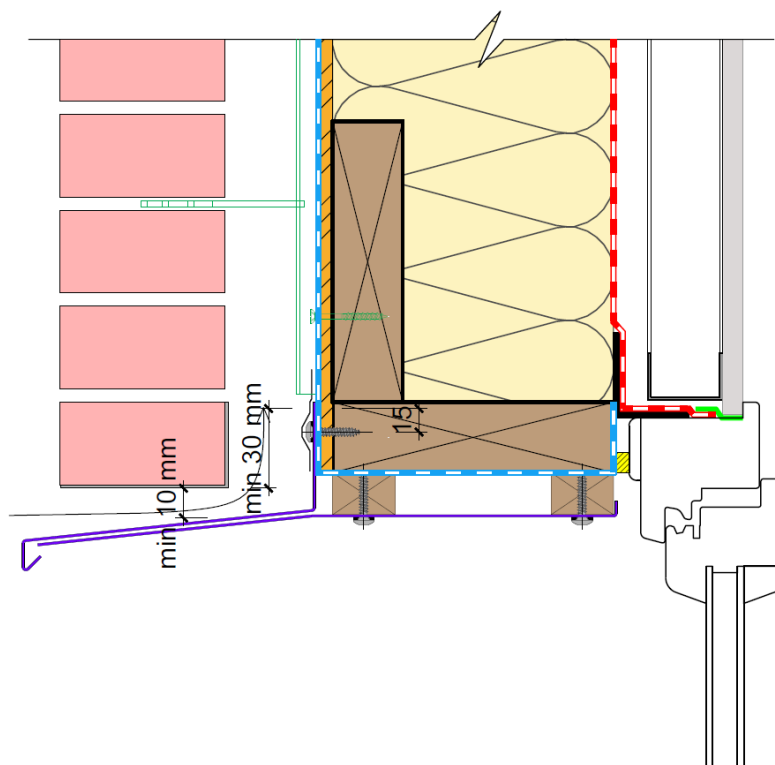


Figure 29 - Exemple de conception entre larmier et cornière d'appui du mur maçonné

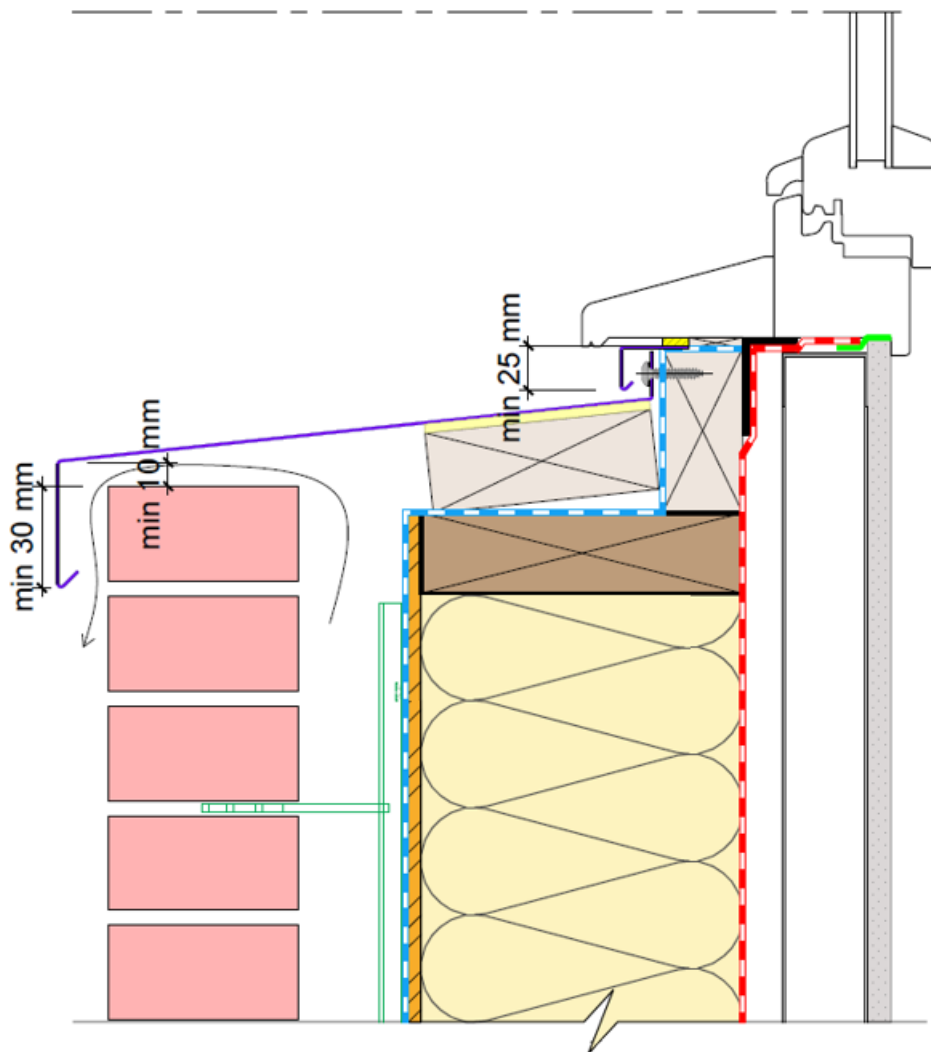


Figure 30 - Exemple de conception entre mur maçonné, bavette d'appui et calfeutrement

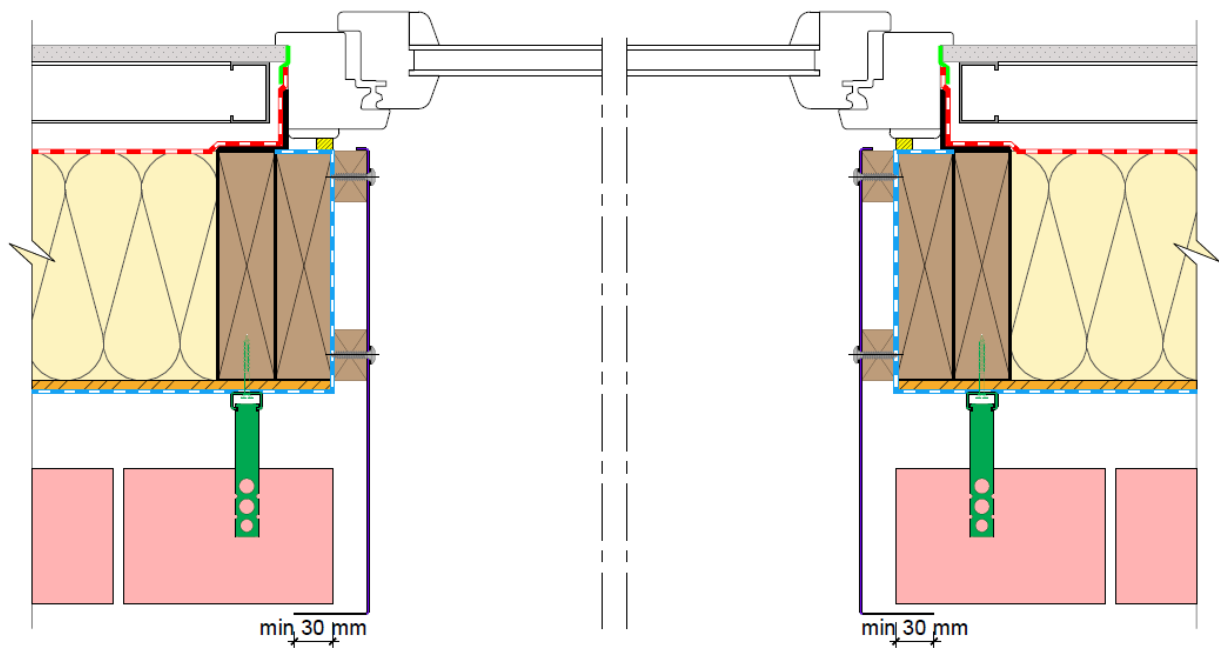
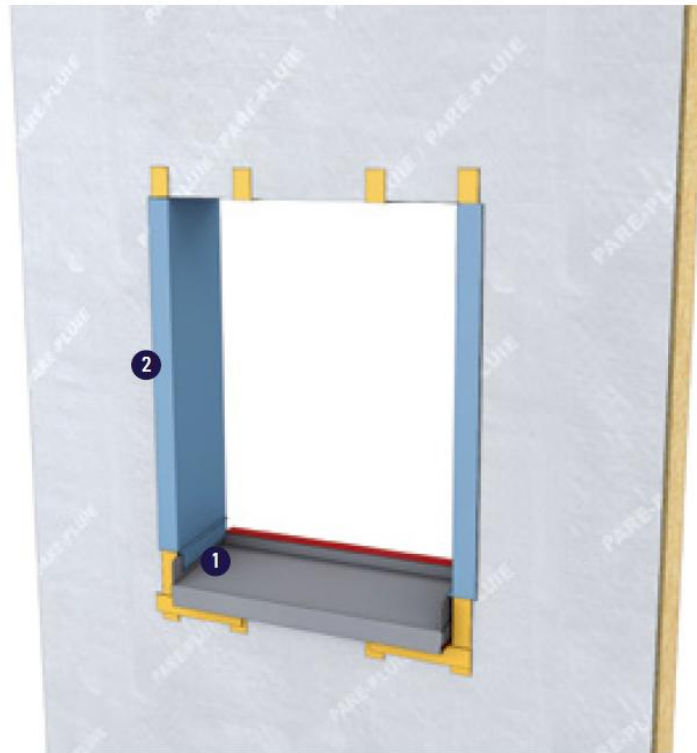


Figure 31 - Détail sur menuiserie avec encadrement rapporté en métal - exemple pour attache plate et rail



Recouvrements collés au mastic colle :

- ❶ 3 cm entre la bande et les oreilles de la bavette
- ❷ 5 cm entre la bande et le pare-pluie principal côté extérieur

Figure 32 : Pose des bandes d'étanchéité dans le chevêtre – issu du calepin de chantier Réalisation des encadrements de baies et intégration des menuiseries dans les parois bois – programme PACTE

3.7. Choix des composants dans le cadre de cette étude

3.7.1. Maçonnerie

Le choix des briques, du mortier et de la technique de jointoiment vise à prendre en compte des solutions courantes de maçonnerie. La maçonnerie de briques apparentes montées à joint épais, technique la plus répandue aujourd'hui, présente un joint d'environ 10 mm. Un couple brique-mortier adapté au montage à joint semi-épais, de 3 à 8 mm, est également considéré, pour répondre aux demandes des architectes.

Pour cette étude, deux types de briques ont été choisies, en fonction de leur densité (une pleine et une perforée), et en fonction du type de montage qu'elles permettent : montage à joint épais et à joint semi-épais au sens du DTU 20.1 [1]. Le montage à joint épais est le plus traditionnel et toutes les briques conformes à l'EN 771-1 [5] peuvent être posées à joint épais. Le Tableau 11 présente les principales propriétés déclarées par les fabricants des briques prises en compte.

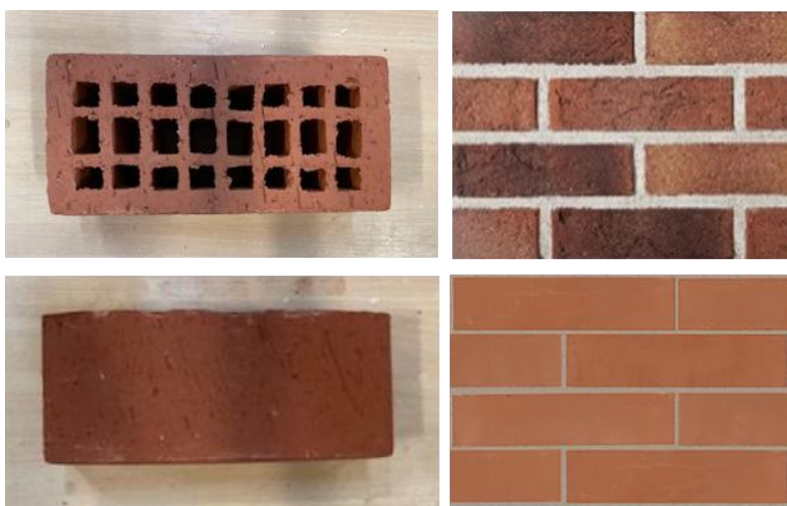


Figure 33 - Brique perforée pour montage à joint épais (en haut), et brique pleine pour montage à joint semi-épais (en bas)

WOODSTONE – Murs doubles en briques apparentes sur support en bois

Tableau 11 - Caractéristiques déclarées des briques apparentes étudiées dans le cadre du projet (DoP)

Nom de la brique	Type de brique	Fabricant	Dimensions longueur x largeur x hauteur (mm)	Poids unitaire déclaré	Absorption d'eau déclarée (%)	Résistance à la compression déclarée (MPa)	Durabilité (tenue au gel/dégel)	Dilatation à l'humidité
TAIGA de type U	Brique perforée	Briqueteries du Nord	220x105x65	2	12	> 25 (RC 250)	F2 (exposition sévère)	≤ 0,6 mm/m
Terre rouge HTR WF de type U	Brique pleine	Wienerberger	215x102,5x50	2,3	10	≥ 30 (RC 300)	F2 (exposition sévère)	≤ 0,6 mm/m

Le choix des deux mortiers utilisés dans ce projet pour le joint épais et pour le joint semi-épais a été réalisé sur la base des caractéristiques techniques de mortiers industriels prêts-à-l'emploi. Le Tableau 12 résume les principales propriétés déclarées par les fabricants des mortiers choisis.



Figure 34 - Mortiers retenus, conditionnés en sac

Tableau 12 - Caractéristiques déclarées des mortiers choisis pour l'étude

Type de mortier	Liant	Densité de la pâte (t/m ³)	Granulométrie maximale (mm)	Absorption d'eau (kg/m ² .min ^{0,5})	Taux de gâchage préconisé (%)	Résistance à la flexion (MPa)	Résistance à la compression (MPa), catégorie déclarée
Mortier de montage PRB	Ciment Portland Artificiel	2 ± 0,1	4	≤ 0,5	10 à 12	2 à 7	10, M10
Mortier PRB MJ VIF	Ciment Portland Artificiel	1,7± 0,1	≤ 2	≤ 0,5	19 à 21	≥ 3	10, M10

3.7.2. Ossature en Bois

L'ossature en bois retenue dans cette étude est conforme au NF DTU 31.2 [2].

Les plans de l'ossature choisis pour les essais à grande échelle de la partie 7 sont donnés en Figure 35 :

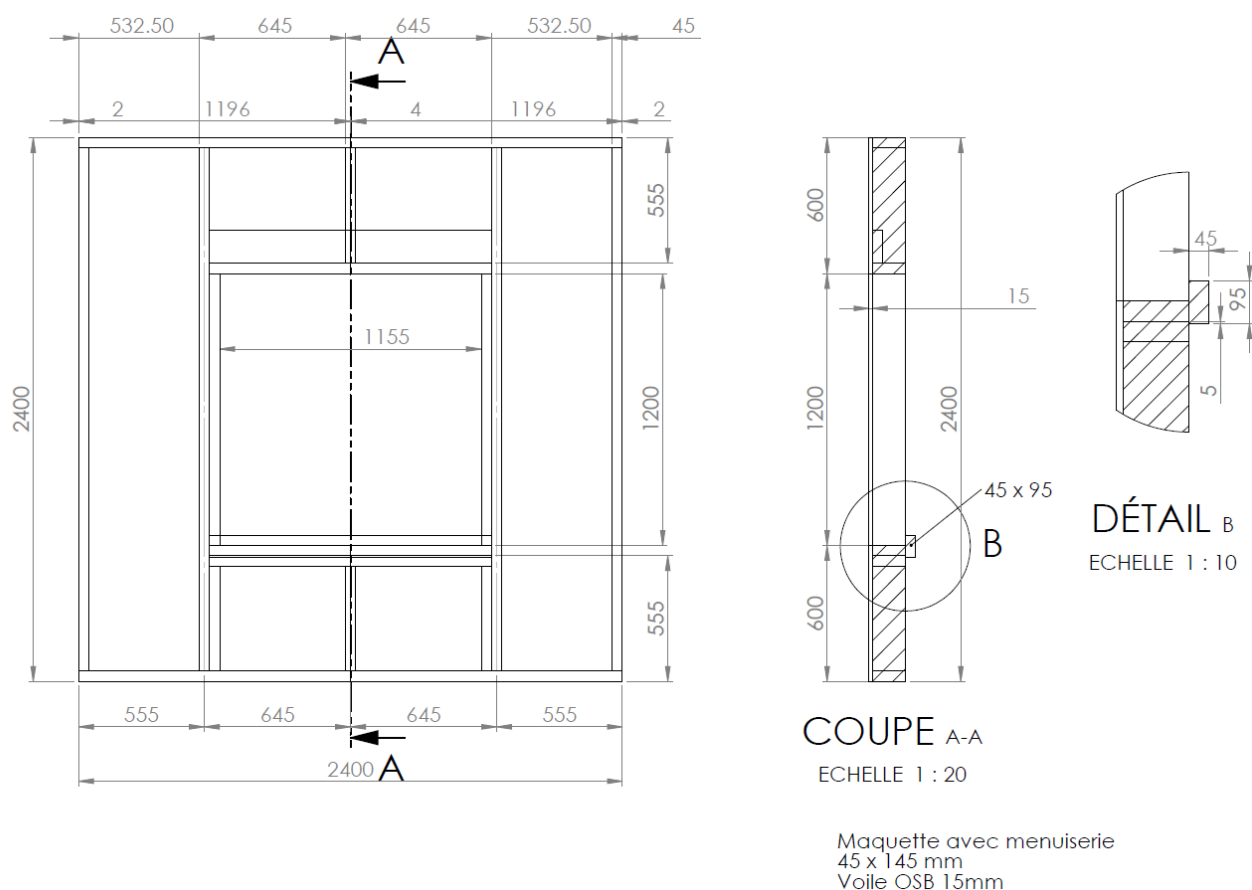


Figure 35 - Plan de l'ossature en bois pour les essais à grande échelle

3.7.3. Liaison Ossature en bois - Maçonnerie

3.7.3.1. Types

Plusieurs systèmes de fixation existent pour solidariser le mur maçonné à la structure support. Le choix des attaches a été le fruit de discussions avec le fabricant d'attaches et d'accessoires LEVIAT, sur la base des recherches bibliographiques et des échanges autour de retours d'expériences.

Deux modèles d'attaches ont été retenus pour l'étude :

- Une attache filaire (tige métallique) avec une extrémité ondulée pour améliorer l'adhérence dans le mortier, l'autre extrémité étant filetée, pour se visser dans l'ossature bois
- Une attache plate (plaque de faible largeur) avec trois perforations à l'extrémité pour améliorer l'adhérence au mortier côté mur maçonné, des encoches pour s'encaster dans un rail métallique fixé côté ossature en bois, et un profil casse-goutte.



Figure 36 - Attaches (tiges anti-dévers) choisies pour l'étude



Figure 37 - Photo de l'attache filaire



Figure 38 - Photo de l'attache plate avec casse-goutte (sans rail)

3.7.3.2. Densité d'attaches

La densité d'attaches est à déterminer par le bureau d'études dimensionnant l'ouvrage se basant sur les performances des systèmes considérés.

Dans cette étude, les essais réalisés à petite échelle permettent de définir les performances minimales du système attache + mortier + brique.

En fonction du domaine d'emploi de l'ouvrage, une densité d'attaches est calculée.

Selon le NF DTU 20.1 [3], la densité d'attaches retenue pour les murs doubles sur support béton ou maçonnerie varie entre $2/m^2$ pour une hauteur de bâtiment $\leq 6m$ (ou 2 étages) et $5/m^2$ pour une hauteur de bâtiment $> 8m$ (ou 2 étages).

Au pourtour des encadrements de baie, cette densité d'attaches est de 1 tous les 4 rangs au minimum.

Un calepinage sur les attaches doit ainsi être réalisé avant la mise en œuvre.

Dans le cadre de cette étude, il a été retenu une densité d'attaches de $5/m^2$ en partie courante et 1 tous les 4 rangs au minimum au pourtour des encadrements de baie. Le sujet est traité dans la partie 5.6.

3.8. Mise en œuvre

3.8.1. Mise en œuvre des attaches plates sur rail

La mise en œuvre du mur double est réalisée en plusieurs phases.

3.8.1.1. Repérage des ossatures sous le pare-pluie

Avant la mise en œuvre des rails, le repérage de la position des ossatures permettant d'ancrer les fixations des rails doit être réalisé.

Ce repérage est fourni par l'entreprise ayant mis en œuvre le système pare-pluie. Il s'agit soit :

- D'un marquage visible sur la surface du pare-pluie ;
- De la fourniture de plans dédiés permettant de définir précisément la position des supports de rails.

Nota : Cela peut également être réalisé par l'entreprise « bois » par la pose de tasseaux permettant la fixation provisoire du pare-pluie.

3.8.1.2. Séquençage

Le séquençage de la mise en œuvre se déroule de la manière suivante :

- Pose des rails sur l'ossature bois par des vis ancrées dans les montants d'ossature de 30 mm minimum



Figure 39 - Positionnement des rails sur l'ossature bois

- Pose du profilé métallique en pied de mur (voir §3.5.1.2)
- Montage du mur maçonné (avec joints non garnis ou grilles sur le ou les premiers rangs pour assurer la ventilation de la lame d'air voir §3.5.1)



Figure 40 - Montage du mur maçonné

- Intégration à l'avancement des attaches plates dans les rails, selon le calepinage établi.



Figure 41 - Positionnement des attaches plates dans les rails selon le calepinage défini

3.8.2. Mise en œuvre des attaches filaires sur tasseaux

3.8.2.1. Repérage des ossatures sous le pare-pluie

Avant la mise en œuvre des tasseaux, le repérage de la position des ossatures permettant d'ancrer les fixations des tasseaux doit être réalisé.

Ce repérage est fourni par l'entreprise ayant mis en œuvre le système pare-pluie. Il s'agit soit :

- D'un marquage visible sur la surface du pare-pluie ;
- De la fourniture de plans dédiés permettant de définir précisément la position des supports de tasseaux.

Nota : Cela peut également être réalisé par l'entreprise « bois » en charge de la pose de tasseaux permettant la fixation provisoire du pare-pluie.

3.8.2.2. Séquençage

Le séquençage de la mise en œuvre se déroule de la manière suivante :

- Pose des tasseaux sur l'ossature bois avec des vis ancrées dans les montants d'ossature de 30 mm minimum



Figure 42 - Positionnement des tasseaux sur l'ossature bois

- Pose du profilé métallique en pied de mur (voir §3.5.1.2)
- Montage du mur maçonné (avec joints non garnis ou grilles sur le ou les premiers rangs pour ménager la ventilation de la lame d'air voir §3.5.1)



Figure 43 - Montage du mur maçonné

- Intégration à l'avancement des attaches filaires dans les tasseaux et montants de l'ossature bois (ancrage minimum de 30 mm) selon le calepinage établi



Figure 44 - Vissage des attaches filaires dans les tasseaux selon le calepinage défini

4. Performances attendues et stratégie d'étude

4.1. Etanchéité à l'air

La paroi interne assure à elle seule l'étanchéité à l'air.

La technique de mur-double maçonné sur ossature en bois comporte une ossature répondant aux spécifications de la NF DTU 31.2 [2]. Il n'y a aucune interaction entre le mur maçonné et le système d'étanchéité à l'air de la paroi, positionné du côté intérieur du mur bois.

L'étanchéité à l'air est donc assurée par le respect des exigences du NF DTU 31.2 [2] en partie courante et au droit de l'ensemble des points singuliers de la construction.

4.2. Etanchéité à l'eau

Dans le cadre de cette étude, les dispositions constructives retenues pour l'étanchéité à l'eau et la résistance à la pluie battante des façades est compatible avec l'exigence Ee1 (étanchéité à l'eau de niveau 1). Le paragraphe 8 du NF DTU 31.2 [2] indique les niveaux d'exigences minimaux, en fonction de la région de vent, de la catégorie de rugosité du terrain, et de la hauteur de la façade (voir également le Tableau 4 du présent document).

4.3. Compatibilité de déformation entre les 2 murs

Les variations dimensionnelles des différents éléments du mur doivent être prises en compte dans la conception de l'ouvrage pour éviter toute concentration de contraintes, éventuelles sources de fissures.

Ces variations dimensionnelles sont de plusieurs natures :

- les dilatations, retraits, gonflements dus aux variations de températures et d'humidité
- les déplacements verticaux du bois et de la maçonnerie (tassement, fluage...)
- les déplacements horizontaux (sous sollicitation de vent)

4.3.1. Dilatations, retraits, gonflements dus aux variations de températures et d'humidité

4.3.1.1. Maçonnerie

Selon la norme NF EN 1996-2[26], il est recommandé de prévoir des joints de rupture verticaux et horizontaux pour prendre en compte les effets du mouvement dû à la température et à l'humidité, du fluage et du fléchissement, ainsi que les effets des contraintes provoquées par les charges verticales ou latérales, de sorte que la maçonnerie ne soit pas affectée par ces actions.

Il est recommandé que l'espacement horizontal entre les joints verticaux des murs extérieurs non porteurs en maçonnerie non armée ne dépasse pas $l_m = 12 \text{ m}$.

Selon NF EN 771-1+A1/CN:2017 [5], la valeur moyenne de la dilatation conventionnelle à l'humidité des briques, déterminée par essai conformément à la norme [32], ne doit pas être supérieure à 0,6 mm/m.

Selon le NF DTU 20.1 P3 [3], le coefficient de dilatation thermique α_t de la maçonnerie en terre cuite est prise égale à $6,0 \times 10^{-6}/\text{C}$.

La norme NF EN 1996-1-1 /NA [33] donne une indication des valeurs de retrait/gonflement et du coefficient de dilatation thermique à utiliser ; à défaut d'indication précise sur les produits utilisés, les valeurs recommandées de calcul peuvent être adoptées :

- La plage de retrait/gonflement à l'humidité ou à long terme de la maçonnerie en terre cuite est de 0,0 à 0,6 mm/m. La valeur recommandée de calcul est égale à 0,3 mm/m.
- La plage du coefficient de dilatation thermique α_t de la maçonnerie en terre cuite est de 4 à $8 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. La valeur de calcul recommandée est égale à $6,0 \times 10^{-6}/\text{C}$.

4.3.1.2. Bois

Selon la NF EN 336 [34], la variation dimensionnelle due aux variations de teneur en humidité est de 0,25% par pourcentage d'humidité pour du résineux (quasi exclusivement utilisé pour les ossatures en bois) dans l'épaisseur et la largeur.

On ne considère pas de variation due à la teneur en humidité dans la longueur.

Les éléments de l'ossature en bois sont considérés comme étant en classe de service 2. En considérant une variation hygrométrique du bois entre 20 et 12%, les retraits et gonflements induits sont de :

- $45 \times 0,25\% \times 8 = 0,9 \text{ mm}$ entre 2 montants de la COB
- $90 \times 0,25\% \times 8 = 1,8 \text{ mm}$ entre la lisse basse et la traverse de la COB

4.3.2. Déplacements verticaux du bois et de la maçonnerie

4.3.2.1. Maçonnerie

Selon la norme NF DTU 20.1 P3 [3], la loi de comportement de la maçonnerie en compression ou relation contrainte-déformation, est représentée par un diagramme linéaire. La résistance en traction de la maçonnerie est considérée comme nulle.

La déformation ultime de la maçonnerie ϵ_{mu} est prise égale à 3,5 ‰ pour les éléments du groupe 1 (volume de toutes les alvéoles $\leq 25 \%$ du volume brut).

La norme NF EN 1996-1-1 /NA [33] et la NF DTU 20.1-P3 donnent une plage des valeurs de coefficients de fluage ultime ϕ_{∞} de la maçonnerie en terre cuite de 0,5 à 1,5. La valeur de calcul recommandée est égale à 1,0.

4.3.2.2. Bois

On considère dans l'étude un dimensionnement à L/500 pour les éléments en bois.

4.3.3. Déplacements horizontaux

La structure interne de l'ossature en bois doit reprendre les sollicitations de type vent dans le plan du mur. Selon la NF EN 1995-1-1 [35], le dimensionnement de la structure est réalisé à $H/500$.

4.3.4. Compatibilité des déformations

Dans un premier temps, il a été choisi de considérer une déformation différentielle verticale due aux déplacements verticaux de l'ossature en bois de $L/500$. C'est cette déformation qui a été appliquée aux premiers essais sur les maquettes grande échelle de la partie 7 (voir §4.5).

Après les essais d'étanchéité à l'eau et de résistance au vent, il a été choisi de tester les maquettes avec une déformation différentielle verticale plus importante (jusqu'à 30mm) pour appréhender le comportement global dû aux variations de dilatation, humidité, retraits/gonflements, tassement et fluage.

4.4. Stabilité hors plan du parement en maçonnerie

Selon NF EN 1995-1-1 [35], le dimensionnement de la structure bois est réalisé à $H/500$.

Dans le cadre de cette étude, seule les charges de vent sont prises en compte puisque le domaine d'emploi exclut les catégories d'importance du bâtiment et / ou zones de sismicité qui nécessitent une obligation de dimensionnement de l'ouvrage au séisme.

La stabilité de la paroi externe d'un mur double doit être justifiée sous sollicitations pondérées de vent, en pression et en dépression selon les Eurocodes. La paroi externe est connectée par des attaches de liaison ancrées dans la paroi interne. Les sollicitations de vent doivent pouvoir être reprises par ces attaches de liaison pour les transmettre en totalité à la paroi interne (ossature en bois).

4.5. Stratégie d'étude pour répondre aux exigences

Des essais petite échelle ont été réalisés afin de caractériser les performances individuelles des éléments constitutifs de l'ouvrage :

- Briques
- Mortiers
- Liaison brique/mortier (caractérisée par des essais de cisaillement)
- Attaches
- Ancrage des attaches (étudié en traction et compression)

Les résultats de ces essais à petite échelle nous permettent de faire des choix sur les matériaux (briques, mortiers, types et densité d'attaches).

Des modèles éléments finis ont été mis en place, recalés aux essais à petite échelle réalisés. Ces modèles permettent de mieux comprendre le fonctionnement des liaisons et se projeter en réalisant notamment des études paramétriques pour extrapoler les résultats à d'autres configurations.

Enfin, les hypothèses sont validées par des essais à grande échelle représentatifs de la vie en œuvre de l'ouvrage. Il a été choisi de réaliser les essais successifs suivants :

- Un essai de vieillissement mécanique de déformation différentielle pour qualifier les déformations différentielles entre maçonnerie et ossature bois jusqu'à un déplacement différentiel de $L/500$ soit 4,8mm dans un premier temps.
- Un essai de vieillissement mécanique cyclique par une mise en parallélogramme de la maquette pour représenter les sollicitations réelles et de fatigue induites par des sollicitations de type vent jusqu'à un déplacement maximal de $H/500$ soit 4,8mm.
- Un essai d'étanchéité à l'eau et de résistance au vent après les sollicitations mécaniques correspondant à 1840 Pa soit toute zone de vent en France Métropolitaine (zone de vent de 1 à 4).
- Un essai de déformation différentielle (déplacement accru de manière progressive jusqu'à 30 mm) si les maquettes ne montrent pas de dégradations et permettant de visualiser le comportement du système jusqu'à une déformation différentielle critique.

5. Essais petite échelle

Les essais retenus s'appuient sur des normes lorsque qu'elles existent ou des protocoles adaptés. Le Tableau 13 en fait la synthèse.

Tableau 13 - Liste des essais réalisés à petite échelle et leurs méthodes de référence

Essais	Méthode d'essai	Commentaire
Résistance à la compression des briques	NF EN 772-1+A1 : 2015 [25] Méthode d'essai des éléments de maçonnerie – Partie 1 : Détermination de la résistance à la compression	
Caractérisation du mortier de pose	NF EN 1015-11 : 2019 [36] Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie – Partie 11 : détermination de la résistance en flexion et en compression du mortier durci	
Caractérisation attaches	Essai de traction sur presse avec extensomètre vidéo	Essais complémentaires pour le développement du modèle E.F.
Résistance au cisaillement	NF EN 1052-3 : 2003 [37] et NF EN 1052-3/A1 : 2007 [38] Méthodes d'essai de la maçonnerie – Partie 3 : détermination de la résistance initiale au cisaillement	Mode opératoire B (sans charge de pré compression pendant l'essai)
Résistance à la traction et à la compression des attaches (tiges anti-devers)	NF EN 846-5 : 2013 [39] Méthode d'essai des composants accessoires de maçonnerie – Partie 5 : détermination de la charge admissible à la traction et à la compression et des caractéristiques effort-déformation des attaches murales	Sans précharge de compression pendant la cure des éprouvettes Sans charge de compression pendant l'essai

5.1. Plan d'expérience

Les essais listés ci-dessous ont pour but d'alimenter le jeu de données d'entrée concernant la liaison brique/mortier/attache du modèle numérique.

Un plan d'expérience a été établi. Les différentes configurations à tester sont données dans le Tableau 14.

Tableau 14 - Configurations testées

Configuration	Type de brique	Type de montage	Type d'attache
1	Perforée	Épais (10 mm)	filare
2	Perforée	Épais (10 mm)	plate
3	Pleine	Semi-épais (5 mm)	plate
4	Pleine	Semi-épais (5 mm)	filare

Ce plan d'expérience permet d'évaluer les effets des paramètres suivants sur les performances mécaniques :

- Le modèle d'attache ancrée dans un mortier épais (par comparaison des configurations 1 et 2) ;
- Le modèle d'attache ancrée dans un mortier semi-épais (configurations 3 et 4) ;
- Le couple brique/mortier (configuration 2 et 3 ; configurations 1 et 4) ;
- Le modèle d'attache ancrée dans un mortier semi-épais (configurations 3 et 4).

5.2. Détermination de la résistance à la compression des briques

L'essai de compression sur briques unitaires a été réalisé conformément à la norme NF EN 772-1 + A1 [25] de décembre 2015 à l'aide d'une presse Toni/Technik 6000 kN. La vitesse de chargement a été fixée pour que toutes les éprouvettes cassent à plus de 2 minutes.

La figure 42 montre la brique perforée de type U utilisée (brique TAIGA, de la société Briqueteries du Nord), de dimensions 220 x 105 x 65 mm. Les résultats des essais de compression réalisés sur la brique considérée sont donnés dans le rapport du CTMNC référence 230547-1 [29].



Figure 45 – Brique perforée de type U (Brique TAIGA de la société Briqueteries du Nord) de dimensions 220 x 105 x 65 mm

La figure 43 montre la brique pleine de type U 'Terre Rouge HTR WF' de la société Wienerberger, de dimensions 215 x 102 x 50 mm. Les résultats des essais de compression réalisés sur cette brique sont donnés dans le rapport du CTMNC réf. 230548-1 [40].



Figure 46 – Brique pleine de type U (Brique Terre rouge HTR WF de la société Wienerberger) de dimensions 215 x 102 x 50 mm

Tableau 15 - Synthèse des résultats pour la résistance à la compression des briques

Essais	Moyenne (MPa)	Minimale (MPa)	Maximale (MPa)	Ecart-type (MPa)	Coefficient de variation (%)
--------	---------------	----------------	----------------	------------------	------------------------------

Briques perforées TAIGA de type U					
Resistance à la compression simple	30,7	25,4	35,8	3,9	12,6
Briques pleines terre rouge HTR WF					
Resistance à la compression simple	125,1	114,5	137,4	8,4	6,7

5.3. Caractérisation du mortier de pose

Des éprouvettes normalisées de type 4 x 4 x 16 cm³ ont été confectionnées avec le mortier utilisé pour le montage des maquettes de cisaillement et de traction/compression sur attaches. Le stockage des éprouvettes a été fait en conditions de laboratoire (~20 °C, 55% RH), jusqu'aux échéances de mesure (à partir de 28 jours).

Ces éprouvettes sont été soumises à des essais de traction par flexion (essais de flexions 3 points) et de compression simple, conformément au protocole d'essai de la norme NF EN 1015-11: 2019 [36].

Pour les essais de flexion 3 points, une presse Lloyd instrument 150KPLUS, avec un capteur de force de 30 kN, a été utilisée. L'entraxe des appuis est de 100 mm. La vitesse de montée en charge est égale à 40 N.s⁻¹

Les essais de compression simple ont été réalisés sur la presse Lloyd instrument 150KPLUS avec un capteur de force 300 kN ; la vitesse de montée en charge est égale à 400 N.s⁻¹.

Pour chaque mortier, les essais de flexion 3 points ont été réalisés sur les 3 éprouvettes confectionnées. Les essais de compression simple ont été effectués sur les 6 demi-prismes résultant des essais de flexion.

Pour les essais de compression, deux plaques de répartition en acier, de dimensions 40 x 40 x 10 mm, ont été disposées en parties haute et basse du ½ prisme de mortier, un repère vertical permettant d'assurer leur parallélisme.

Les mortiers ont été testés plusieurs fois, lors du montage des différentes maquettes d'essais (maquettes destinées aux essais de cisaillement, de traction et compression sur attaches). Les rapports d'essais du CTMNC réf. 2304404-1, 2304404-2, 2304404-3, 2304404-5 et 2304404-6 [41] donnent les résultats des essais réalisés. Les Tableau 16 et Tableau 17 en présentent une synthèse.

Tableau 16 - Synthèse des résultats des essais de caractérisation mécanique du mortier de montage 'PRB'

	Moyenne	Min	Max	Ecart-Type	Coefficient de Variation
Masse volumique (g/cm ³)	1,9	1,7	2,0	0,13	7%
Résistance à la traction/Flexion (MPa)	4,7	3,5	6,6	1,20	26%
Résistance à la compression simple (MPa)	23,5	13,5	33,3	7,38	31%

Tableau 17 - Synthèse des résultats des essais de caractérisation du mortier PRB MJ VIF

	Moyenne	Minimal	Maximal	Ecart-type	Coefficient de Variation
Masse volumique (g/cm ³)	1,6	1,6	1,7	0,04	3%
Résistance à la traction/Flexion (MPa)	4,2	3,3	5,3	0,79	19%
Résistance à la compression simple (MPa)	12,8	10,4	16,0	1,66	13%

Des essais complémentaires ont été réalisés dans les laboratoires de l'Institut Pascal sur le mortier PRB MJ VIF. Ces essais de flexion 3 points visaient à déterminer le module de Young du mortier pour alimenter le modèle par éléments finis. Le tableau 17 donne les résultats de ces essais.

Tableau 18 : Module de Young du mortier PRB MJ VIF

	Eprouvette-1	Eprouvette-2	Eprouvette-3
Module d'Young (MPa)	2780	4579	3154

5.4. Caractérisation mécanique des attaches

a- Attache filaire

Des essais de traction directe ont été réalisés sur les attaches afin d'en déterminer les propriétés mécaniques, permettant leur modélisation. Etant donnée la faible dimension de l'attache, les essais ont été réalisés directement sur la tige. Celle-ci est fixée dans les mors de la presse. Un extensomètre vidéo permet le suivi de 2 repères disposés à une distance respectant la norme d'essai de traction sur acier (ISO 6892), comme illustré à la Figure 47. La rupture s'est bien produite dans la zone de mesure. Les données résultant de ces essais et servant à la modélisation sont présentées au Tableau 19.

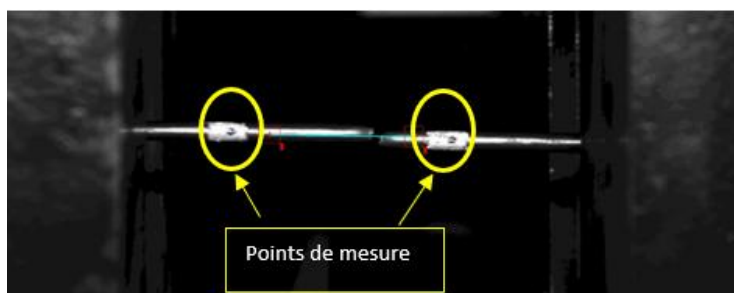


Figure 47 - Essai de traction attache de maçonnerie

Tableau 19 : Caractérisation mécanique de l'attache filaire

Module de Young (MPa)	Contrainte élastique à (0.2%) (MPa)	Contrainte max (MPa)
200 000	585	761

b- Attache plate seule

Du fait de la faible dimension de l'attache, aucune éprouvette de traction standard ne peut être prélevée dans celle-ci afin de réaliser un essai de traction pour définir le matériau. En revanche, les essais de traction ont permis d'avoir des données servant à la calibration du modèle numérique. En effet, grâce à l'extensomètre vidéo, il a été possible de suivre le déplacement relatif entre 2 points de mesure positionnés autour d'un trou de l'attache. Ces points servent alors de référence pour reproduire l'essai de manière numérique et calibrer les propriétés du modèle matériau présenté au paragraphe 0. Le Tableau 20 présente les résultats de cette calibration.

Tableau 20 - Caractérisation mécanique de l'attache plate

Module de Young (MPa)	Module de poisson	Contrainte élastique à (0.2%) (MPa)	Contrainte max (MPa)
200 000	0.3	382	787

c- Attache plate avec rail

Ces essais réalisés sur la presse équipée avec un extensomètre vidéo visaient à évaluer la résistance à l'arrachement de l'attache du rail. Le rail est tenu par une vis dans un mors tandis que la languette qui vient s'emboîter dans le rail est fixée dans l'autre mors. La mise en traction de l'ensemble permet d'atteindre une rupture par déchaussement de l'attache du rail. L'extensomètre vidéo mesure le déplacement relatif entre 2 points, l'un sur le rail et l'autre sur l'attache, et permet ainsi de valider le modèle numérique de la sortie de l'attache du rail. Les résultats de ces essais sont présentés à la Figure 48.

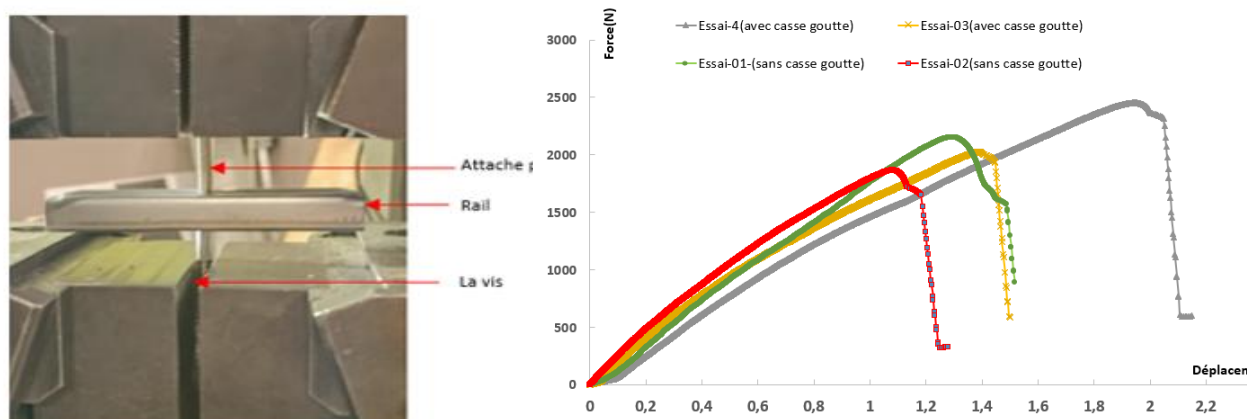


Figure 48 - Illustration de l'essai de traction sur attache avec rail.

5.5. Caractérisation de la liaison brique/mortier : essais de cisaillement

Selon la norme NF EN 771-1:2011+A1:2015 [5], pour les briques destinées à être utilisées dans des constructions soumises à des exigences structurelles, l'adhérence de la brique combinée au mortier doit être déclarée sous la forme de la valeur caractéristique de la résistance initiale au cisaillement conformément à l'EN 1052-3 [38].

Selon la norme NF EN 998-2:2016 [27], la résistance caractéristique initiale au cisaillement des mortiers de montage performanciers combinés à des éléments de maçonnerie conformes à la norme NF EN 771 est au moins égale à 0,15 N/mm² pour les mortiers d'usage courant (G) et les mortiers allégés (L).

Des essais de cisaillement ont été réalisés conformément aux normes NF EN 1052-3 : 2003 [37] et NF EN 1052-3/A1 : 2007 [38] en suivant le mode opératoire B. Ce mode opératoire n'applique aucune charge de pré-compression à la maquette pendant l'essai de cisaillement ; il conduit à des résultats conservatifs.

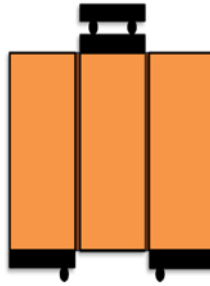


Figure 49 - Schéma de montage des maquettes destinées aux essais de cisaillement

Pour chaque essai, 10 maquettes ont été réalisées avec 30 briques prélevées de manière aléatoire. Les faces de pose des briques ont été dépoussiérées puis humidifiées à l'aide d'une éponge, avant l'application du mortier.

Le montage des triplets de briques a été effectué par un maçon à l'aide de cales afin de s'assurer que la taille des joints soit bien respectée.



Figure 50 - Montage des échantillons pour l'essai de cisaillement sur briques perforées montées à joint épais (à gauche) et briques pleines montées à joint semi-épais (à droite)

Immédiatement après la confection, chaque maquette a été pré-compressée en répartissant la charge de façon uniforme pour obtenir une contrainte verticale comprise entre $2,0 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2$ et $5,0 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2$.

Les maquettes ont été conservées sans les bouger jusqu'à l'essai (durant 28 jours) en conditions de laboratoire ($\sim 20^\circ \text{C}$, 55% RH), en les recouvrant de feuilles de polyéthylène pour empêcher la dessiccation.

Les maquettes sont ensuite soumises aux essais de cisaillement à l'aide d'une presse Lloyd instrument 150KPLUS équipée avec un capteur de force de 30 kN et des outillages adaptés. La contrainte de cisaillement a été appliquée à une cadence comprise entre $0,1 \text{ N/mm}^2$ et $0,4 \text{ N/mm}^2$ par minute.

La résistance au cisaillement de chaque maquette à $0,01 \text{ N/mm}^2$ près est calculée, à l'aide de la formule suivante :

$$f_{voi} = \frac{F_{i,max}}{2A_i}$$

Où :

f_{voi} : Résistance au cisaillement d'un échantillon individuel (N/mm^2 ou MPa)

$F_{i,max}$: Force maximale à la rupture, obtenue par l'essai (N)

A_i : Surface d'application de la charge - Section transversale des maquettes parallèles à l'effort de cisaillement (mm²).

La résistance initiale caractéristique au cisaillement, f_{vok} a été calculée en utilisant la méthode donnée dans les normes NF EN 1052-3:2003 et NF EN 1052-3/A1:2007 :

$$f_{vok} = \min [0,8 \times f_{vo} ; f_{voi(\min)}]$$

où :

f_{vo} est la résistance initiale moyenne au cisaillement.

$f_{voi(\min)}$ est la résistance au cisaillement individuelle la plus basse.

Les rapports d'essais CTMNC réf. 2304404 [41]– 2 & 3 donnent les résultats des essais de cisaillement réalisés. Une synthèse des résultats est présentée ci-dessous. Ces résultats permettent d'apprécier la compatibilité entre brique et mortier.

a. Briques perforées montées à joint épais

Le volume d'eau préconisé par le fabricant de mortier (ratio 'Eau / Solide' appliqué pour le gâchage) n'a pas permis d'obtenir une ouvrabilité satisfaisante. L'adhérence du mortier à la brique perforée n'a pas été optimale. Les maquettes, même à l'issue de la période de cure, sont restées fragiles et ont dû être transportées jusqu'au banc d'essai avec précautions.

Le type de rupture est similaire pour les 10 éprouvettes testées : rupture par cisaillement à l'interface brique-mortier, sur l'une ou les deux faces de la brique.



Figure 51 - Faciès de rupture des éprouvettes de cisaillement, brique perforée montée à joint épais

Le Tableau 21 présente une synthèse des résultats des essais de cisaillement sur briques perforées montées à joint épais avec le mortier de montage PRB.

Tableau 21 - Synthèse des résultats des essais de cisaillement sur briques perforées Taiga de Briqueteries du Nord montées à joint épais avec le mortier de montage PRB

Essais	Moyenne (MPa)	Minimale (MPa)	Maximale (MPa)	Eart-type (MPa)	Coefficient de variation (%)	Valeur caractéristique –
--------	---------------	----------------	----------------	-----------------	------------------------------	--------------------------

						méthode simple (MPa)
Résistance au cisaillement	0,20	0,14	0,31	0,05	22	Min [0,16; 0,14] = 0,14

La résistance caractéristique au cisaillement des briques perforées montées à joint épais à l'aide du mortier de montage PRB est égale à 0,14 MPa. Ce type de mortier ne semble pas optimal avec la brique considérée.

b. Briques pleines montées à joint semi-épais

Le type de rupture est similaire pour les 10 éprouvettes testées : rupture par cisaillement à l'interface brique - mortier, sur l'une ou les deux faces de la brique.



Figure 52 - Faciès de rupture des éprouvettes de cisaillement, brique pleine montée à joint semi-épais

Le Tableau 22 présente une synthèse des résultats des essais de cisaillement réalisés sur les briques pleines Terre rouge HTR WF montées à joint semi-épais à l'aide du PRB MJ VIF.

Tableau 22 - Synthèse des résultats des essais de cisaillement sur briques pleines Terre rouge HTR WF de Wienerberger montées à joint semi-épais à l'aide du mortier PRB MJ VIF

Essais	Moyenne (MPa)	Minimale (MPa)	Maximale (MPa)	Ecart-type (MPa)	Coefficient de variation (%)	Valeur caractéristique – méthode simple (MPa)
Résistance au cisaillement	0,45	0,23	0,62	0,12	28	Min [0,36 ; 0,23] = 0,23

La valeur caractéristique de la résistance initiale au cisaillement des briques pleines Terre rouge montées à joint semi-épais à l'aide du PRB MJ VIF est égale à 0,23 MPa. Il semble donc possible d'utiliser ce type de mortier avec la brique en terre cuite visée dans l'étude.

5.6. Caractérisation de l’ancrage des attaches : essais de traction et de compression sur attaches

L’objectif des essais est d’évaluer l’adhérence des attaches filaires et plates décrites plus haut dans ce document. Les attaches ont été scellées à l’aide du mortier de montage traditionnel PRB ou mortier PRB MJ VIF. Les mortiers ont été appliqués avec des épaisseurs égales à 10 mm (joint épais) et 5 mm (joint semi-épais), respectivement.

Le nombre de maquettes pour chaque type d’essai a été de dix (10). Pour chaque essai, 20 briques ont été prélevées de façon aléatoire et disposées sur le banc de montage. Les surfaces de pose ont été dépoussiérées.

Une fois gâché le mortier au taux de gâchage préconisé par le fabricant, les surfaces de briques ont été humidifiées à l’aide d’une éponge avant l’application du mortier. Les attaches sont ensuite disposées au centre de la brique à mi-épaisseur joint. La vérification de la planéité est faite à l’aide d’un niveau à bulle après avoir posé la deuxième brique.

Immédiatement après la confection, chaque éprouvette a été précompressée en répartissant la charge de façon uniforme pour obtenir une contrainte verticale comprise entre $2,0 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2$ et $5,0 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2$. Les éprouvettes ont ensuite été conservées sans les bouger jusqu’à l’essai (durant 28 jours) en conditions de laboratoire ($\sim 20^\circ \text{C}$, 55% RH), en les recouvrant de feuilles de polyéthylène.

Les maquettes font ensuite l’objet d’essais de traction et de compression sur attaches, conformément à la norme d’essai NF EN 846-5 : 2013, sans pré-compression (mode opératoire conduisant à des performances conservatives).

La presse LLOYD Instruments LR 150 K Plus équipée avec un capteur de force de 30 kN a été utilisée pour les essais. La vitesse de chargement a été réglée pour que la rupture ait lieu après environ 1 à 3 min de chargement.

❖ *Résistance caractéristique*

La résistance caractéristique est déterminée par la formule suivante :

$$F_k = F(n) \times (1 - k_n \times V_x)$$

Avec :

- F_k : Résistance caractéristique.
- $F(n)$: Moyenne des résistances mesurées de n échantillons ;
- V_x : Coefficient de variation ;
- n : Nombre d’expériences ou de résultats d’essais
- k_n : facteur de fractile caractéristique selon le tableau D.1 de l’annexe D de la norme NF EN 1990 Bases de calcul des structures – annexe D [42]

Il convient d’utiliser la ligne « V_x connu » si le coefficient de variation V_x , ou une limite supérieure réaliste de celui-ci, est connu a priori. Il convient d’utiliser la ligne « V_x inconnu » si le coefficient de variation V_x n’est pas connu a priori, mais doit être estimé à partir de l’échantillon.

Dans notre étude, V_x est inconnu, nous avons donc $k_n = 1,92$ pour $n = 10$ et $k_n = 2,00$ pour $n = 8$.

❖ **Calcul du nombre nécessaire d'attaches :**

La paroi externe est stabilisée par des attaches de liaison. On considère que les sollicitations de vent sont reprises en totalité par les attaches de liaison.

Le nombre d'attaches (n_t) par unité de surface est déterminé par :

$$n_t \geq \frac{W_{Ed} \times \gamma_m}{F_t \times 0,7}$$

Où :

- W_{Ed} est la valeur de calcul de la sollicitation de vent, en pression ou en dépression, par unité de surface ;
- γ_m est le coefficient de sécurité de l'attache de liaison (catégorie F – cf. NF DTU 20.1 P3 : 2020 [3]) ;
- F_t est la résistance admissible de l'attache, en compression et en traction.

La valeur du coefficient γ_m dépend du niveau de qualité des matériaux mis en œuvre, et du niveau de contrôle de l'exécution. Les contrôles d'exécution sont définis en deux niveaux IL1 et IL2 selon NF DTU 20.1 P3. Les calculs dans le présent document correspondent au niveau de contrôle IL1, soit $\gamma_m = 2,7$.

Les rapports d'essais CTMNC réf. 2304404 – 4, 5, 6 & 7 [41] donnent les résultats des essais de traction et de compression sur attaches. Une synthèse de ces résultats est présentée ci-après. Ces résultats permettent de déterminer la résistance admissible de l'attache, et de calculer le nombre d'attaches nécessaires.

a) Attache filaire – Briques perforées montées à joint épais avec le mortier de montage PRB

Le premier montage des doublets de briques avec les attaches filaires a été réalisé par le maçon ayant monté les maquettes de cisaillement, avec la même méthode que les montages précédents. Le manque d'adhérence brique-mortier, déjà identifié lors de l'essai de cisaillement, a de nouveau été observé. Certaines maquettes se sont désolidarisées avant d'être positionnées sur la presse. Le décollement se fait en surface de la brique, malgré une certaine pénétration du mortier à l'intérieur des alvéoles des briques.

Le type de rupture lors des essais de traction est similaire pour les éprouvettes testées : désolidarisation des maquettes à l'interface brique mortier (Figure 53).



Figure 53 – Essais de traction - Désolidarisation des maquettes une des interfaces brique mortier

Un flambage de l'attache est observé lors des essais de compression. Sur certaines maquettes, on observe aussi une rupture à l'interface brique mortier (Figure 54).



Figure 54 – Essais de compression - Flambement de l'attache filaire après essai de compression sur doublets de briques perforées montées à joint épais & Désolidarisation d'une brique de certaines maquettes.

Le Tableau 23 présente une synthèse des résultats pour la configuration de l'attache filaire - briques perforées montées à joint épais avec le mortier de montage PRB.

Tableau 23- Synthèse des résultats pour la configuration de l'attache filaire & briques perforées montées à joint épais avec le mortier de montage PRB

Essais	Moyenne (N)	Ecart-type (N)	Coefficient de Variation (%)	Valeur minimale (N)	Valeur maximale (N)	Valeur caractéristique (N)
Résistance à la traction	1381*	1138	82	427	3050	-
Résistance à la compression	2990*	648	22	2230	3815	1556
Résistance admissible de l'attache (N)			-			

* Moyenne de 6 valeurs individuelles car quatre maquettes se sont désolidarisées avant d'être positionnées sur la presse.

Le Tableau 23 montre une dispersion importante des résultats de traction. Plusieurs maquettes se sont désolidarisées avant l'essai de traction, et aussi celui de compression. Cela confirme que l'adhérence entre les briques considérées et le mortier de montage PRB n'est pas optimale.

b) Attache filaire – Briques pleines et mortier à joints semi-épais PRB MJ VIF

Les modes de rupture observés lors des essais de traction sont les suivants :

- Sur une partie des maquettes, on observe une désolidarisation à l'interface brique-mortier, ainsi qu'un déchaussement de l'attache (Figure 55) ;
- Sur une autre partie des maquettes, on observe une désolidarisation sur les 2 interfaces brique-mortier, ainsi qu'un déchaussement de l'attache (Figure 56) ;
- Sur une maquette ayant conduit à la charge de rupture la plus faible, on observe une désolidarisation à l'interface brique-mortier, l'attache restant ancrée dans le joint (Figure 57).



Figure 55 – Essais de traction - Désolidarisation des maquettes sur une des interfaces brique mortier & Désolidarisation de l'attache du joint de mortier.

WOODSTONE – Murs doubles en briques apparentes sur support en bois

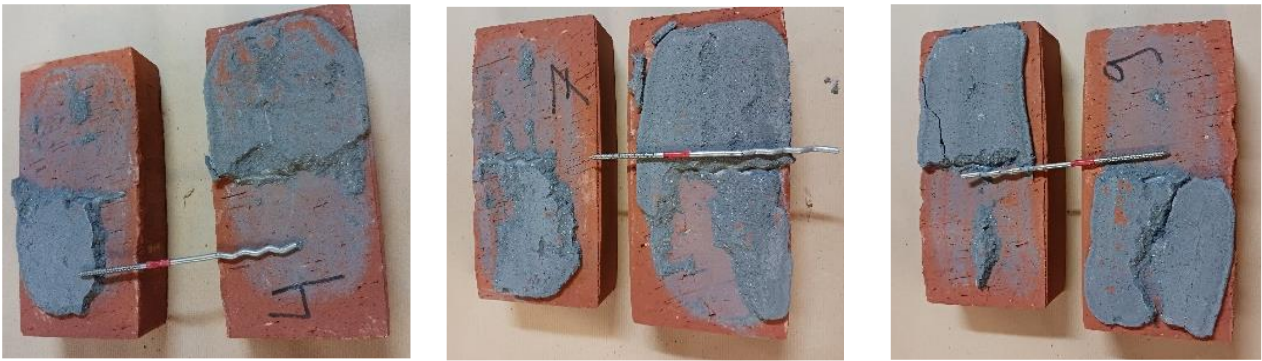


Figure 56 – Essais de traction - Désolidarisation des maquettes sur les 2 interfaces brique mortier & Désolidarisation de l'attache du joint de mortier



Figure 57 – Essais de traction - Désolidarisation de la maquette n°5 sur une des interfaces brique mortier. L'attache reste figée dans le joint de mortier.

Le type de comportement lors des essais de compression a été similaire pour toutes les éprouvettes testées : Arrêt de l'essai par flambage de l'attache (Figure 58).



Figure 58 – Essais de compression - Flambage de l'attache des maquettes

Le Tableau 24 présente une synthèse des résultats pour la configuration de l'attache filaire & brique pleine et mortier à joint semi-épais PRB MJ VIF.

Tableau 24 - Synthèse des résultats pour la configuration de l'attache filaire & brique pleine et mortier en joint semi-épais PRB MJ VIF

Essais	Moyenne (N)	Ecart-type (N)	Coefficient de Variation (%)	Valeur minimale (N)	Valeur maximale (N)	Valeur caractéristique (N)
Résistance à la traction	5090	1573	31	1217	6588	2060
Résistance à la compression	3536	893	25	2342	5345	1839
Résistance admissible de l'attache (N)			1839			

Le nombre d'attaches par unité de surface est donné dans le tableau 25 ci-dessous :

Tableau 25 - Nombre minimal d'attaches par unité de surface de la configuration d'attache filaire - brique pleine et mortier de joint semi-épais PRB MJ VIF

Attache filaire – Brique pleine et mortier joint semi-épais	Pression / dépression de vent à l'Etat-Limite Ultime (N/m²)						
	1000	1260	1470	1680	1890	2100	2310
Nombre d'attaches min au m²	3	3	4	4	4	5	5

La fiche technique du fabricant recommande l'utilisation de 5 attaches/m² au minimum. Dans la suite de l'étude, nous retiendrons 5 attaches/m² pour une pression/dépression de vent de 1840 Pa.

a) Attache plate – Brique perforée et mortier de joint épais PRB MJ VIF

Le type de rupture observé lors des essais de traction a été similaire pour l'ensemble des éprouvettes testées : Fissuration à l'interface brique-mortier avec un léger déplacement de l'attache, et fissure sur l'une des briques avec un léger départ de matière autour de l'attache (Figure 59).



Figure 59 – Essais de traction - Fissuration des maquettes à l'interface brique-mortier avec léger déplacement de l'attache et fissure sur une des briques

Les modes de rupture observés lors des essais de compression sont les suivants :

- Sur une partie des maquettes, on observe une désolidarisation à l'interface brique-mortier. Le mortier et l'attache restent en place sur une face de brique (Figure 60) ;
- Sur une autre partie des maquettes, on observe une fissuration à l'interface brique-mortier, sans déformation ni déplacement de l'attache (Figure 61) ;
- Sur une grande partie des maquettes, on observe un flambage de l'attache sans déchaussement de celle-ci, ni fissuration du mortier (Figure 62).

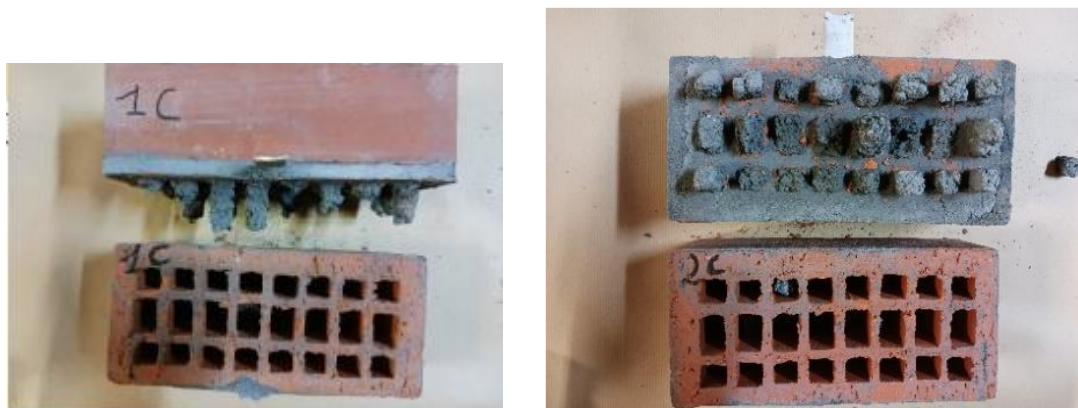


Figure 60 – Essais de compression - Désolidarisation des maquettes à l'interface brique mortier. Le mortier et l'attache restent en place sur une face de brique



Figure 61 – Essais de compression - Fissure des maquettes à l'interface brique mortier sans déformation ni déplacement de l'attache



Figure 62 – Essais de compression - Flambage de l'attache sans désolidarisation de la maquette ni fissuration du mortier.

Le Tableau 26 présente une synthèse des résultats pour la configuration de l'attache plate - brique perforée - mortier de joint épais PRB MJ VIF.

Tableau 26 - Synthèse des résultats pour la configuration de l'attache plate - brique perforée et mortier de joint épais PRB MJ VIF

Essais	Moyenne (N)	Ecart-type (N)	Coefficient de Variation (%)	Valeur minimale (N)	Valeur maximale (N)	Valeur caractéristique (N)
Résistance à la traction	5242	705	13	3947	6226	3934
Résistance à la compression	8493	2438	29	3053	11312	3764
Résistance admissible de l'attache (N)						3764

Le nombre d'attaches par unité de surface est présenté dans le tableau 27, ci-dessous :

Tableau 27 - Nombre minimal d'attaches par unité de surface de la configuration d'attache plate - brique perforée et mortier de joint épais PRB MJ VIF

Attache plate dans rail – Brique perforée et mortier joint épais	Pression / dépression de vent à l'Etat-Limite Ultime (N/m ²)						
	1000	1260	1470	1680	1890	2100	2310
Nombre d'attaches min au m ²	2	2	2	2	2	3	3

Ces valeurs sont calculées sur la base de l'utilisation d'attaches sans casse-goutte ni rails.

Les résistances admissibles données par le fabricant sont inférieures à celles calculées précédemment. Pour la suite de l'étude, nous retenons 5 attaches/m² pour une pression/dépression de vent de 1840 Pa.

c) Attache plate – Brique pleine et mortier de joint semi-épais PRB MJ VIF

Les modes de rupture observés lors des essais de traction sont les suivants :

- Sur une partie des maquettes, on observe une désolidarisation au niveau de l'interface brique-mortier. Une partie du mortier reste sur l'une des faces d'une des briques, le restant demeure en place sur la face de la deuxième. L'attache se déchausse du mortier (Figure 63) ;
- Sur une autre partie des maquettes, on observe une désolidarisation au niveau de l'interface brique-mortier. La quasi-totalité du mortier reste sur l'une des faces d'une des briques. L'attache se déchausse du mortier (Figure 64).



Figure 63 - Essais de traction - Désolidarisation des maquettes au niveau de l'interface brique-mortier. Une partie du mortier reste sur l'une des faces d'une des briques, le restant du mortier reste sur la face de la deuxième brique de la maquette. L'attache se déchausse du mortier



Figure 64 - Essais de traction - Désolidarisation des maquettes au niveau de l'interface brique-mortier. La quasi-totalité du mortier reste sur l'une des faces d'une des briques. L'attache se déchausse du mortier

Les modes de rupture observés lors des essais de compression sont les suivants :

- Sur une partie des maquettes, on observe une désolidarisation au niveau de l'interface brique-mortier. Une partie du mortier reste sur une face d'une des briques. Une autre partie reste sur l'autre face, l'attache se désolidarisant du montage (Figure 65) ;
- Sur une majeure partie des maquettes, on observe un flambage de l'attache, sans fissuration du mortier (Figure 66).



Figure 65 - Essais de compression - Désolidarisation des maquettes au niveau de l'interface brique-mortier. Une partie du mortier reste sur l'une des faces d'une des briques. Une autre partie demeure sur l'autre face, et le reste du mortier et l'attache se désolidarisent du montage.



Figure 66 – Essais de compression - Flambage de l'attache sans fissuration du mortier

Le Tableau 28 présente une synthèse des résultats pour la configuration de l'attache plate - brique pleine et mortier de joint semi-épais PRB MJ VIF.

Tableau 28- Synthèse des résultats pour la configuration de l'attache plate - brique pleine et mortier de joint semi-épais PRB MJ VIF

Essais	Moyenne (N)	Ecart-type (N)	Coefficient de Variation (%)	Valeur minimale (N)	Valeur maximale (N)	Valeur caractéristique (N)
Résistance à la traction	5942	1338	23	3124	7276	3318
Résistance à la compression	12789	2196	17	9465	15955	8615
Résistance admissible de l'attache (N)						3318

Le nombre d'attaches par unité de surface est présenté dans le tableau 29, ci-dessous :

Tableau 29 - Nombre minimal d'attaches par unité de surface de la configuration d'attache plate - brique pleine et mortier de joint semi-épais PRB MJ VIF

Attache plate – Brique pleine et de mortier joint semi-épais	Pression / dépression de vent à l'Etat-Limite Ultime (N/m ²)						
	1000	1260	1470	1680	1890	2100	2310
Nombre d'attaches min au m ²	2	2	2	2	3	3	3

Ces valeurs sont calculées sur la base de l'utilisation d'attaches sans casse-goutte ni rails-supports. Les résistances admissibles données par le fabricant sont inférieures à celles calculées. Dans la suite de l'étude, nous retenons 5 attaches/m² pour une pression/dépression de vent de 1840 Pa.

6. Modélisation numérique des attaches par éléments finis

6.1. Description du modèle

Le modèle par éléments finis vise à représenter le comportement mécanique des attaches en les modélisant, ainsi que le mortier et la brique, en traction et compression.

Le modèle a été développé sous l'outil Abaqus en calcul non-linéaire, à la fois géométrique et matériau en éléments volumiques quadratiques. Une étude de sensibilité au maillage a été réalisée afin de déterminer le type de maillage le plus adapté pour les deux types d'attaches : plate et filaire. Pour l'attache plate, un maillage structuré de type hexagonal a été utilisé, avec deux éléments à travers l'épaisseur. En revanche, pour l'attache filaire, un maillage tétraédrique a été choisi en raison de la complexité géométrique de cette pièce.

Dans le cadre de l'étude numérique, deux configurations d'attaches ont été étudiées : l'attache plate avec rail et l'attache filaire.

6.1.1. Géométrie

6.1.1.1. Attache plate / rail

L'attache décrite à la Figure 67 présente une largeur de 19 mm et une épaisseur de 2 mm. Elle comporte trois trous ronds alignés horizontalement : les deux premiers ont un diamètre de 12 mm, tandis que le troisième mesure 10 mm de diamètre. Ces perforations permettent de renforcer l'ancrage dans le mortier. Entre les trous et près des bords, des encoches de 2,5 mm de profondeur sont disposées symétriquement, pour insérer l'attache dans le rail d'une part, et pour améliorer le positionnement et l'adhérence de l'attache dans le mortier d'autre part. Une encoche spécifique, appelée casse-goutte, est intégrée dans la partie plate.

Le casse-goutte n'est pas présent dans les attaches utilisées pour les essais élémentaires. Par conséquent, celui-ci sera étudié dans le cadre de l'analyse paramétrique.

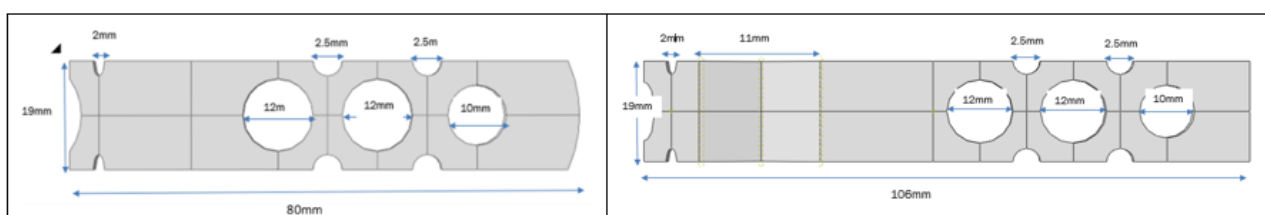


Figure 67 - attache plate avec et sans casse-goutte

Les attaches sont scellées dans le mortier d'une part et se fixent d'autre part dans un rail décrit à la Figure 68. Le rail est fixé sur l'ossature en bois à l'aide de vis de diamètre 6 mm tous les 220 mm. Les attaches sont simplement insérées dans le rail, permettant un déplacement libre dans la longueur du rail.

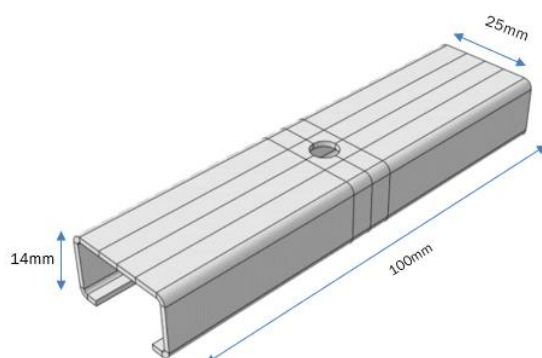


Figure 68 – Détail d'un tronçon de rail

6.1.1.2. Attache filaire

La seconde attache étudiée est l'attache filaire décrite à Figure 69. La partie en zigzag de l'attache correspond à la partie scellée dans le mortier. L'autre partie, filetée, est directement vissée dans l'ossature en bois. Le filetage n'est pas représenté sur le modèle.

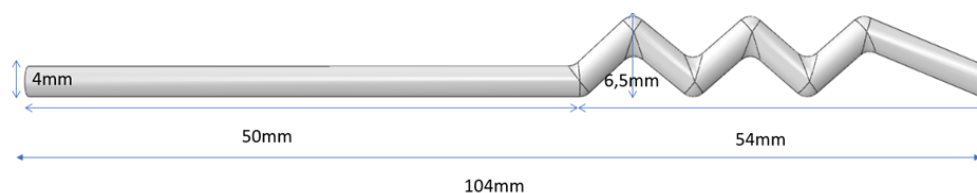


Figure 69 – Attache filaire

6.1.2. Lois de comportement

Les lois de comportement de l'acier constitutif des attaches plates et de la maçonnerie ont été calibrées sur la base des essais de traction réalisés sur les attaches. L'acier constitutif des attaches est modélisé en considérant des lois de comportement en contraintes vraies décrites aux Tableau 19 et Tableau 20 (partie 5.4).

6.1.2.1. Attache plate

La Figure 70 montre l'essai de traction ayant permis de calibrer la loi de comportement de l'acier pour le cas de l'attache plate. La Figure 50 montre la comparaison entre le modèle et les résultats expérimentaux présentés à la partie 5.4.

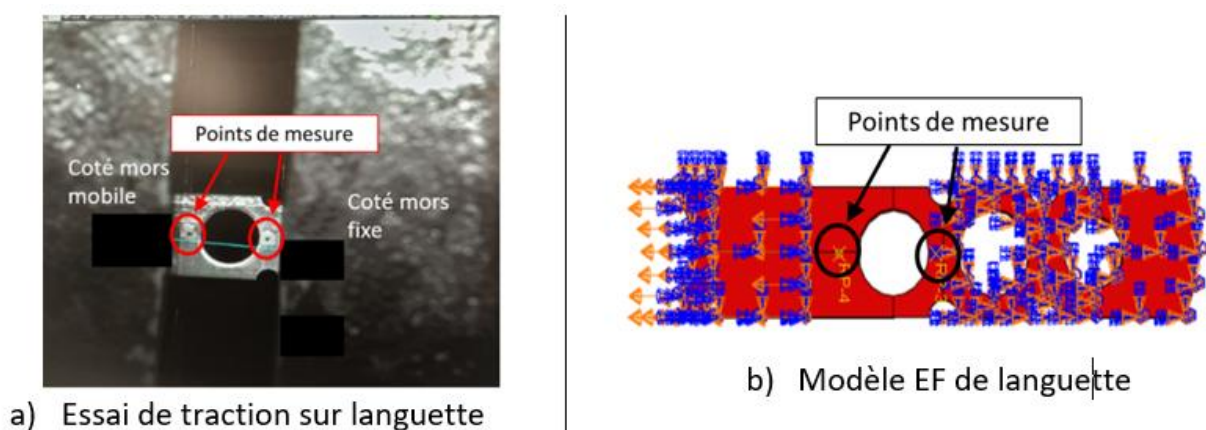


Figure 70 - Présentation de l'éprouvette testée (a) et du modèle numérique correspondant (b)

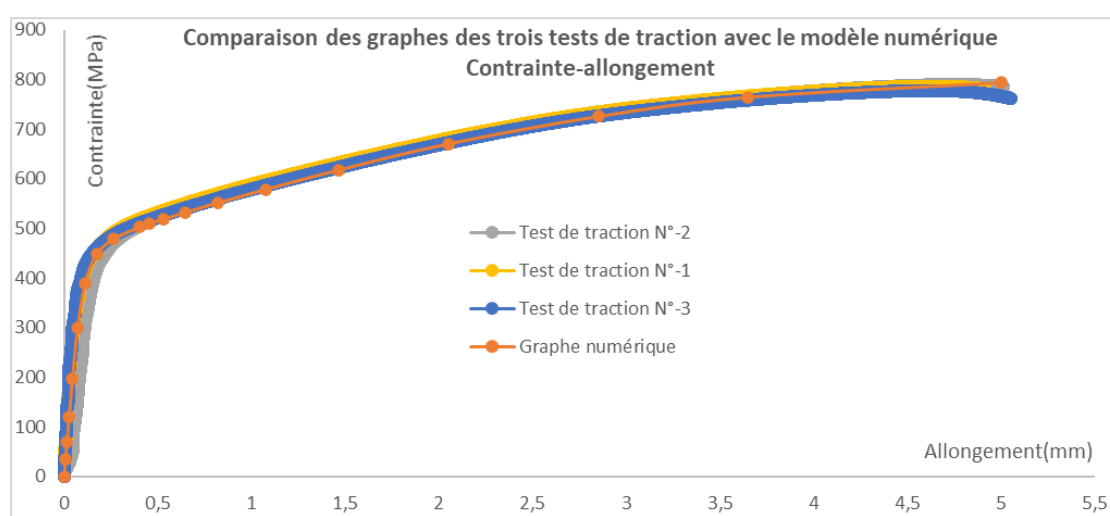


Figure 71 - Comparaison de tests de traction avec le modèle numérique

6.1.2.2. Attache filaire

Le modèle matériau pour l'acier de l'attache filaire se base sur les paramètres présentés à la partie 5.4.

L'essai de traction a été reproduit avec le modèle numérique pour s'assurer de sa bonne représentativité. L'essai de traction unitaire sur l'attache filaire, ainsi que le modèle par élément finis de l'attache sont représentés sur la Figure 72.

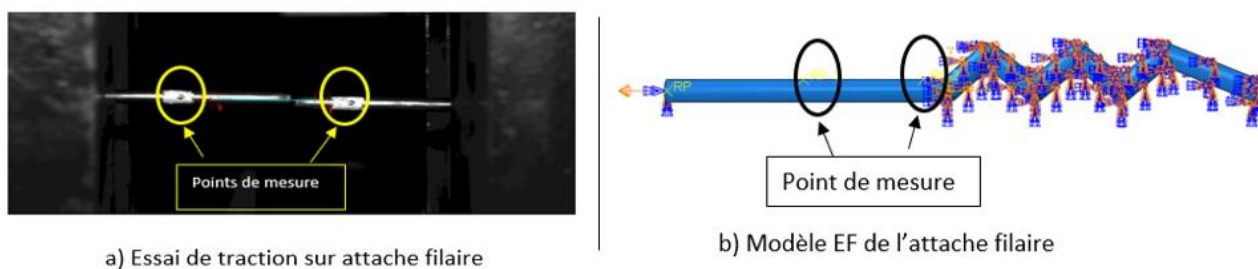
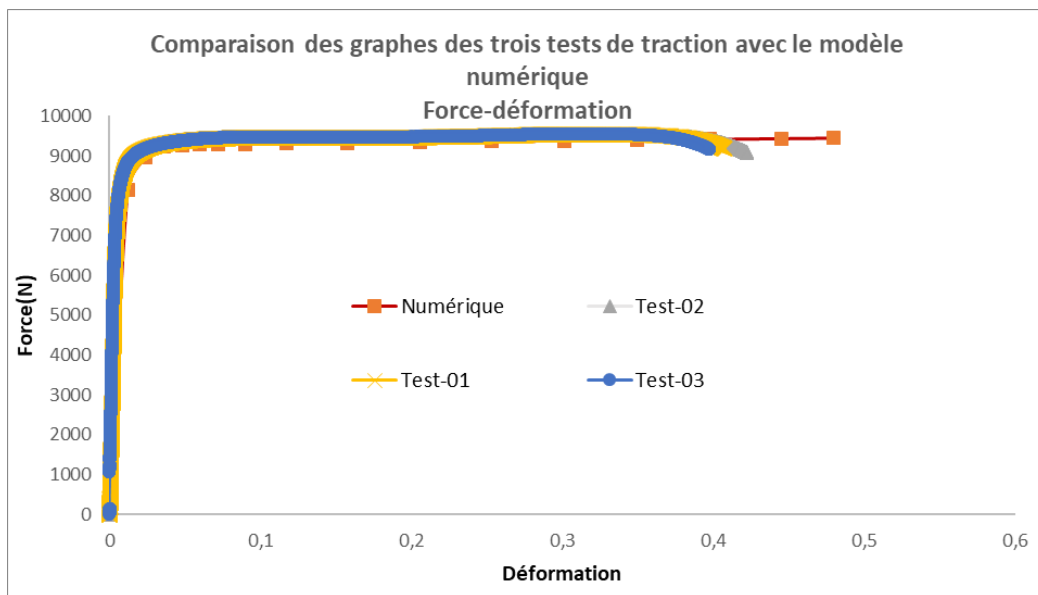


Figure 72 - Essai de traction attache filaire- (a) test expérimental (b) modélisation numérique

La Figure 73 montre la comparaison entre le modèle numérique et les résultats expérimentaux obtenus pour l'attache filaire.



6.1.2.3. Attache plate avec rail

Ce modèle vise à étudier le comportement en traction de l'attache plate associée au rail métallique seul. L'étude vise à s'assurer de la bonne représentativité du modèle pour le mode de ruine spécifique associé à la liaison entre le rail et l'attache se faisant par simple contact. Le modèle introduit donc entre les 2 éléments (rail et attache) une loi de contact frottant avec un coefficient de frottement acier-acier de 0.3.

Afin de valider le modèle EF, des essais de traction de cet ensemble ont été réalisés (partie 5.4). L'objectif du test de traction de l'attache-rail était de déterminer la force maximale atteignable avant la séparation entre l'attache et le rail. Il a été observé que, lors de l'essai de traction, l'attache avait tendance à se décaler, sortant d'un côté du rail et se désaxant par rapport à l'autre. Il a également été observé que la déformation du rail était largement prédominante sur celle de l'attache. La Figure 74 présente le modèle de l'attache plate avec rail. La Figure 75 compare l'évolution de la force en fonction du déplacement pour le modèle éléments finis et les 2 essais. Pour ce faire, le déplacement utilisé est celui obtenu entre les 2 points de mesure précisés à la Figure 74. Il peut être observé une bonne concordance entre le modèle et les essais, avec une différence maximale de 6%, environ. Le modèle numérique permet alors d'étudier en détail l'influence du rail sur le comportement global des attaches, qui apparaît déterminant sur la raideur et la résistance du système.

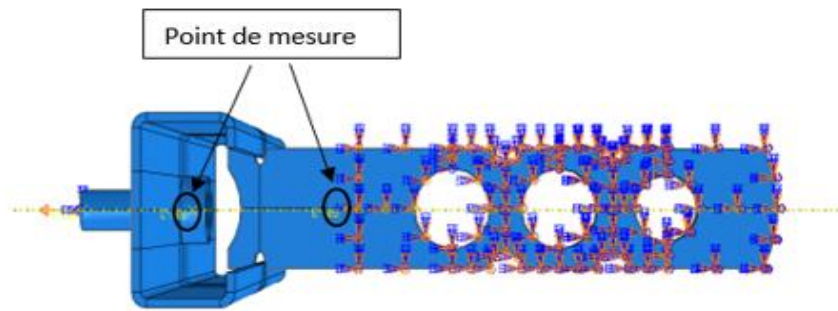


Figure 74 - Modélisation de l'essai de traction attache-rail(encastrement-libre-maillage1mm)

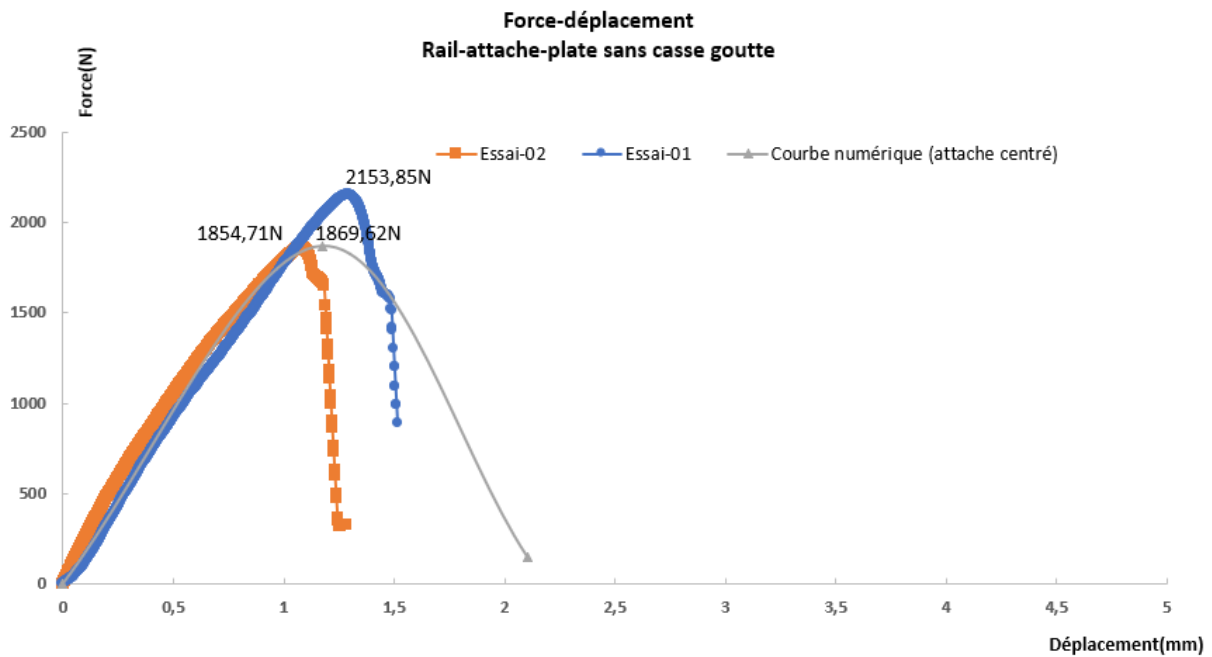


Figure 75 - Résultats des essais de traction rail-attache plate

6.1.2.4. Mortier

Le choix du module de Young du mortier PRB MJ VIF, d'une valeur de 3779 MPa, a été basé sur les données issues de la littérature [43]. Des essais complémentaires de flexion 3 points réalisés à l'Institut Pascal ont permis de vérifier que le module correspondant est représentatif de cette valeur (partie 5.3). Les caractéristiques mécaniques étudiées prennent en compte des lois de comportement exprimées en contraintes vraies, telles que décrites dans le Tableau 17 (section 5.3), et illustrées à la Figure 76. La loi d'endommagement du mortier a été déterminée à l'aide du modèle de Mazars, implémenté sous Matlab. La courbe correspondant à cette loi d'endommagement est présentée à la Figure 77.

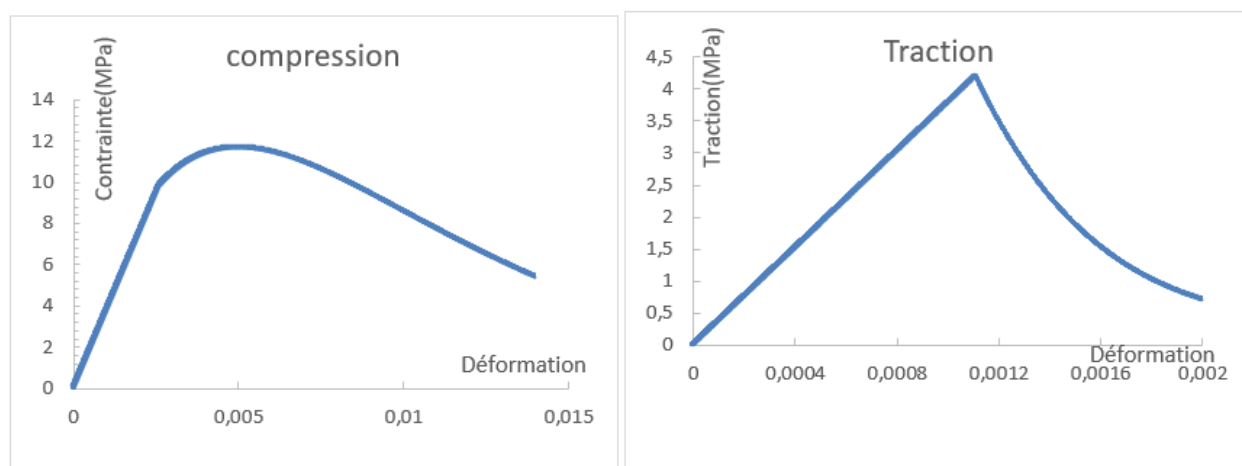


Figure 76 – Courbes contrainte-déformation du mortier PRB MJ VIF : Compression ; traction

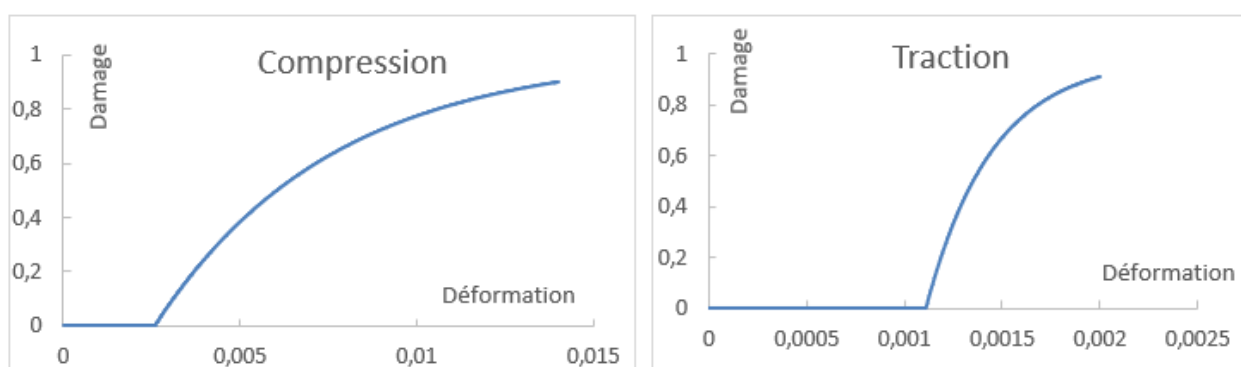


Figure 77 - Endommagement du mortier PRB MJ VIF : Compression ; traction

6.1.3. Modèle cohésif brique-mortier

La connexion entre la brique et le mortier est modélisée au travers d'un modèle cohésif à l'interface des deux matériaux. Ce modèle cohésif a fait l'objet d'une calibration sur la base des essais de cisaillement présentés en partie 5.1. Les résultats expérimentaux montrent une certaine variabilité, ainsi, afin de rendre compte de celle-ci et d'évaluer son impact sur la résistance du système d'attache, il a été choisi de calibrer le modèle cohésif sur les 2 essais donnant respectivement les raideurs et résistances maximale et minimales rappelées au Tableau 30.

Cette calibration détermine 2 paramètres du modèle cohésif, celui associé à la raideur tangentielle (K_t) et celui associé à la résistance au cisaillement maximale, correspondant à une contrainte limite au-delà de laquelle le modèle cohésif n'est plus actif et permet le glissement. La Figure 78 montre l'adéquation du modèle pour la configuration minimale correspondant à l'essai de cisaillement n°2.

Tableau 30 – Raideurs entre la brique et le mortier

Cas	Coefficient de raideur [MPa/mm]	Résistance maximale au cisaillement [MPa]
Configuration minimale	1.1	0.6
Configuration maximale	1.1	0.8

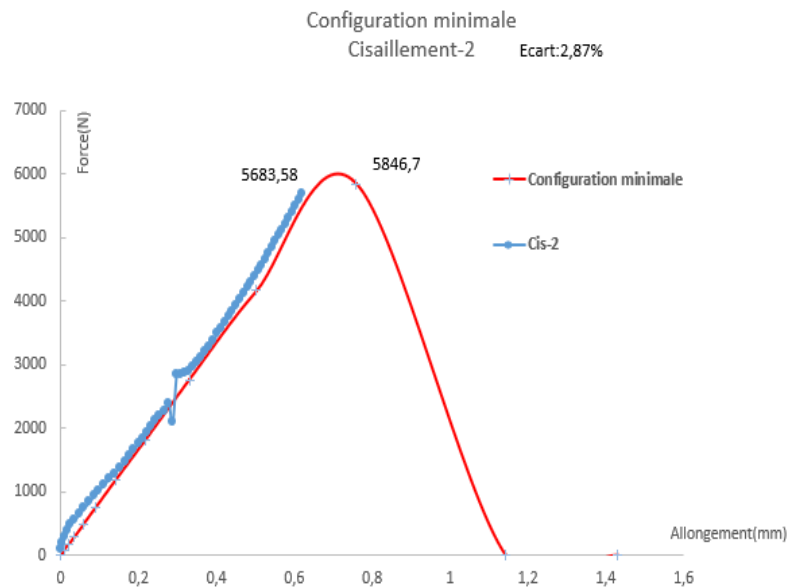


Figure 78 - Superposition des courbes numériques et des courbes expérimentales de l'essai de cisaillement

Dans la suite de l'étude, seul le modèle avec une configuration de cohésion faible brique-mortier est utilisé. Une étude de sensibilité a démontré que l'influence de cette cohésion sur le comportement global de l'attache était faible du fait que la ruine se concentre autour de l'attache et non au niveau de la liaison brique-mortier. Le choix de ne conserver que la configuration minimale vise à pouvoir rendre compte d'un possible détachement du mortier de la brique.

6.2. Modèle complet attache mortier brique

6.2.1. Attache plate en traction

Le modèle se compose de deux briques pleines de dimensions 220mm × 105mm × 50mm, assemblées par un mortier de 5 mm d'épaisseur. Une attache plate sans casse-goutte est ancrée au centre du mortier sur une profondeur de 50mm. L'objectif est de calibrer cette fois le modèle cohésif entre le mortier et l'attache sur la base des essais de traction présenté à la partie 5.6.

Nous disposons de 10 essais de traction présentant une certaine variabilité, le modèle permet de considérer cette variabilité au travers des propriétés du modèle cohésif. Pour ce faire, deux graphes expérimentaux ont été sélectionnés pour calibrer le modèle : l'un correspondant à la configuration donnant les résultats les plus faibles (appelé propriétés minimales) qui correspond à l'essai de traction n°2, et celui donnant les résultats les plus élevés (appelé propriétés maximales) correspondant à l'essai de traction n°4.

Les valeurs des paramètres du modèle cohésif pour ces 2 configurations minimales et maximales sont présentées au Tableau 31. L'objectif de ce modèle cohésif est de rendre compte de la rupture entre le mortier entourant l'attache et le mortier remplissant les trous de l'attache (« billes » de mortier). En effet, expérimentalement, la cohésion entre attache et mortier résulte principalement du fait que le mortier rentre dans les perforations de l'attache. La Figure 79 permet d'illustrer la coupe au niveau de l'attache avec les « billes » de mortier correspondant au mortier présent dans les perforations.

Tableau 31- Raideurs entre l'attache plate et le mortier

Cas	Coefficient de raideur [MPa/mm]	Résistance maximale au cisaillement [MPa]
Forces minimales	1.3	3.1
Forces maximales	2	7.5

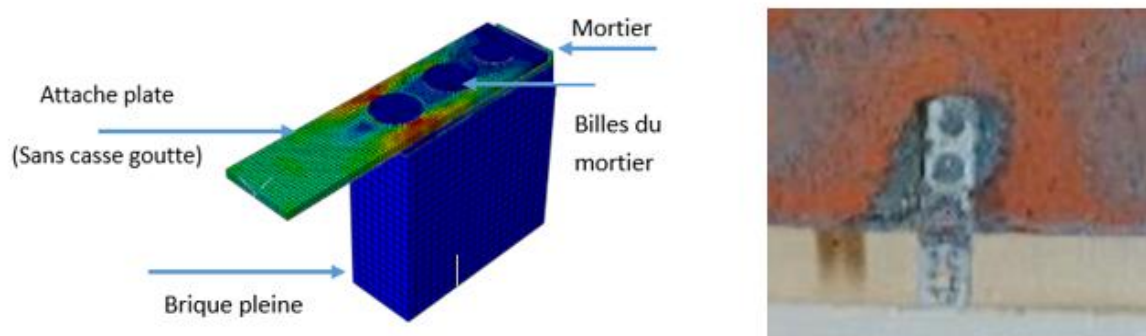


Figure 79 - Modèle : Brique pleine-mortier-attache plate

Une séparation est observée entre le mortier et la brique, ainsi qu'entre l'attache et le mortier. Par ailleurs, une désolidarisation des billes de mortier à l'intérieur de l'attache est également visible, comme le montre la Figure 80. Ce phénomène est similaire à celui observé lors des essais expérimentaux, confirmant une bonne concordance entre les deux approches. La Figure 81 présente la comparaison du modèle avec l'ensemble des essais de traction en considérant les 2 configurations minimales et maximales.

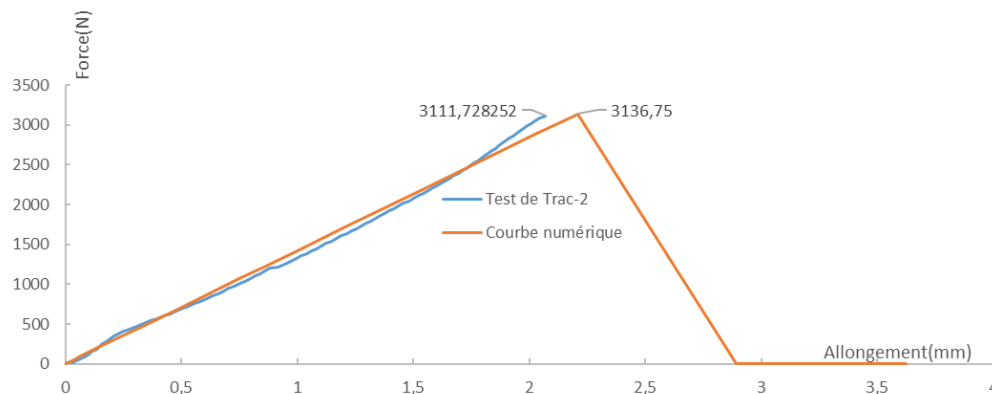


Figure 80 - Comparaison du test de traction avec le modèle numérique du bloc complet dans le cas de faibles forces.

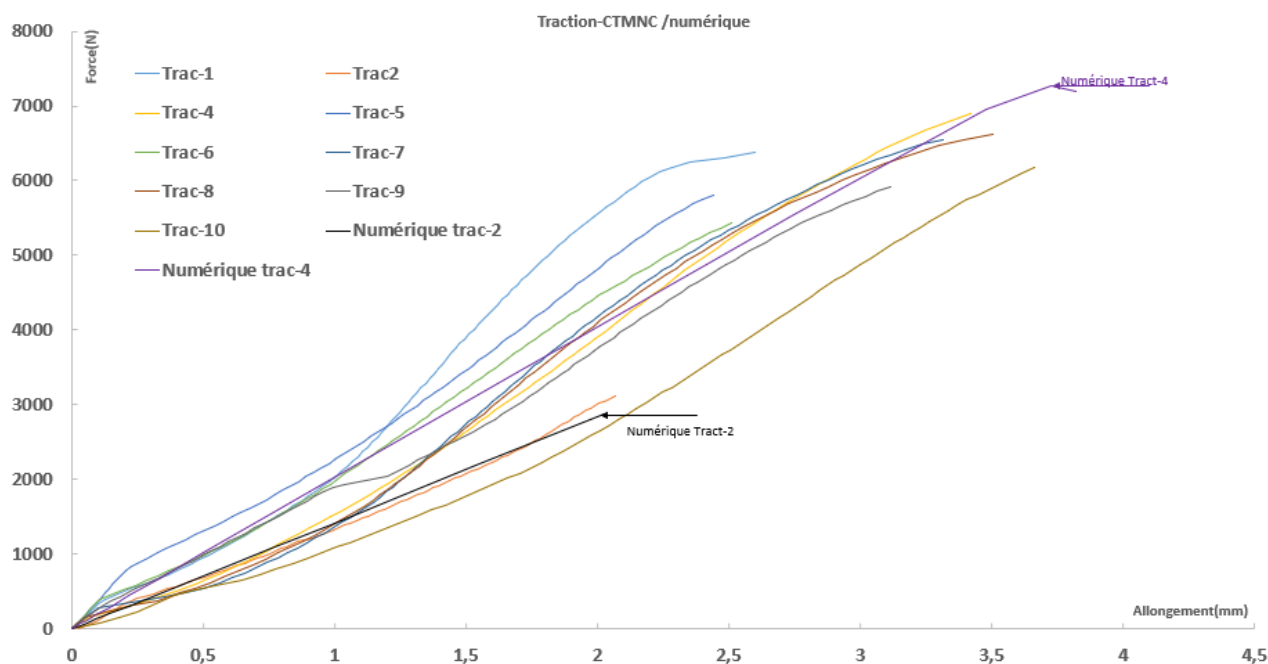


Figure 81 - Superposition des courbes numériques et des courbes expérimentales de l'essai de traction du modèle complet.

6.2.2. Attache filaire en traction

Le modèle se compose de deux briques pleines de dimensions 220 mm × 105 mm × 50 mm, assemblées par un mortier de 5 mm d'épaisseur. Une attache filaire est ancrée à mi-épaisseur du mortier sur une profondeur de 50 mm. L'objectif est de nouveau de calibrer les propriétés du modèle cohésif utilisé à l'interface attache/mortier au travers de 2 configurations correspondant aux 2 essais qui donnent les résultats de propriétés maximale et minimale (essais de traction n°7 et 5 respectivement).

Le Tableau 32 présente les paramètres de raideur et résistance obtenus pour le modèle cohésif.

Tableau 32- Raideurs entre l'attache filaire et le mortier

Cas	Coefficient de raideur [MPa/mm]	Résistance maximale au cisaillement [MPa]
Propriétés minimales	0.45	0.5
Propriétés maximales	1.8	7.2

La Figure 82 permet de visualiser l'attache dans le mortier ainsi que la répartition de contraintes qui s'opère le long de cette attache.

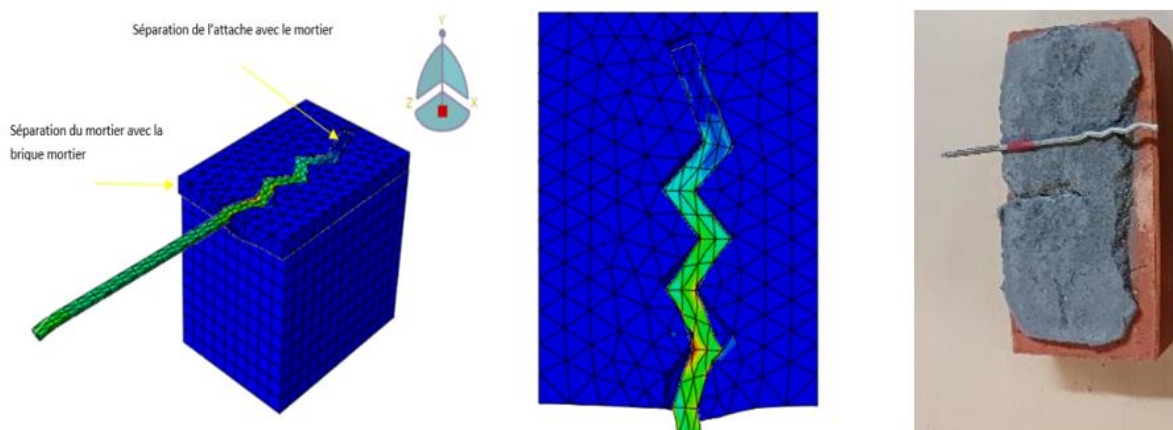


Figure 82 - Séparation du mortier avec l'attache filaire

Une légère désolidarisation est observée entre le mortier et la brique, ainsi qu'entre l'attache et le mortier. Ce comportement est similaire à celui constaté lors des essais expérimentaux, comme illustré à la Figure 82, ce qui confirme une bonne concordance entre les résultats numériques et expérimentaux. La Figure 95 présente la comparaison du modèle avec l'ensemble des essais, en considérant les 2 cas de modèle cohésif (propriétés maximales et minimales).

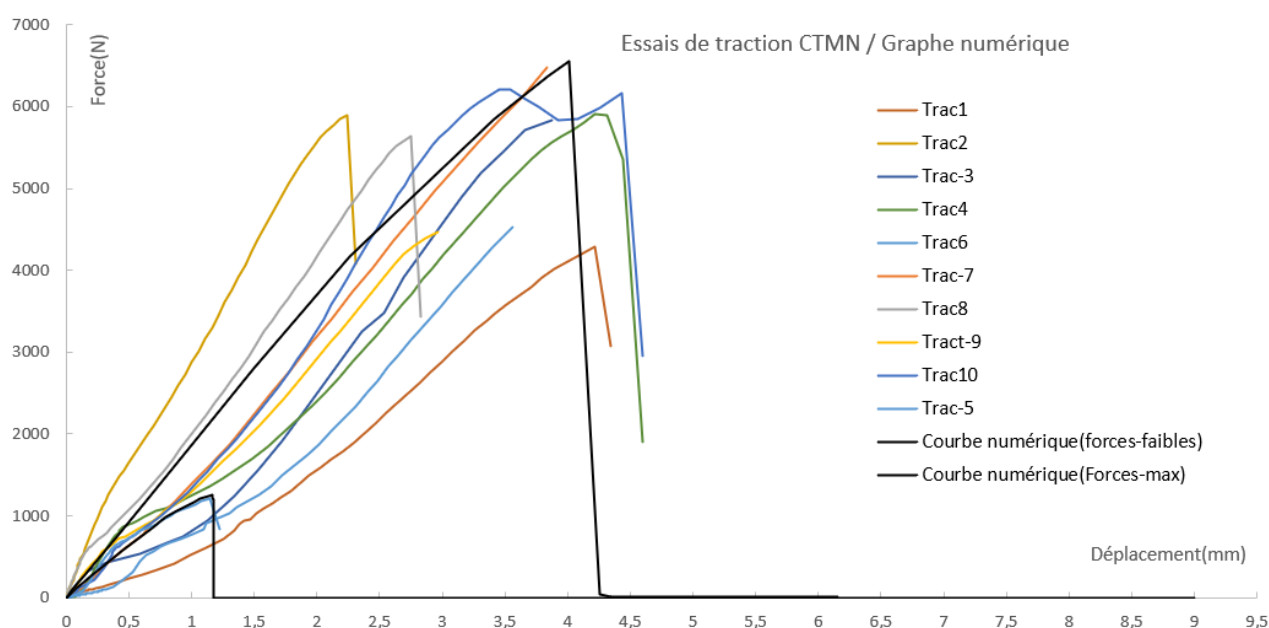


Figure 83 - Superposition des courbes numériques et des courbes expérimentales de l'essai de traction du modèle complet. (Attache filaire)

6.3. Analyse paramétrique

6.3.1. Attache plate en traction : effet de l'excentrement dans le rail

L'objectif de l'excentrement de l'attache par rapport au rail est d'évaluer l'effet de cette déviation sur le comportement du système. Dans ce cas, une excentricité de 1 mm est imposée d'un seul côté du rail comme montré dans la

Figure 84, en conservant les mêmes conditions aux limites que dans le cas de l'attache centrée.

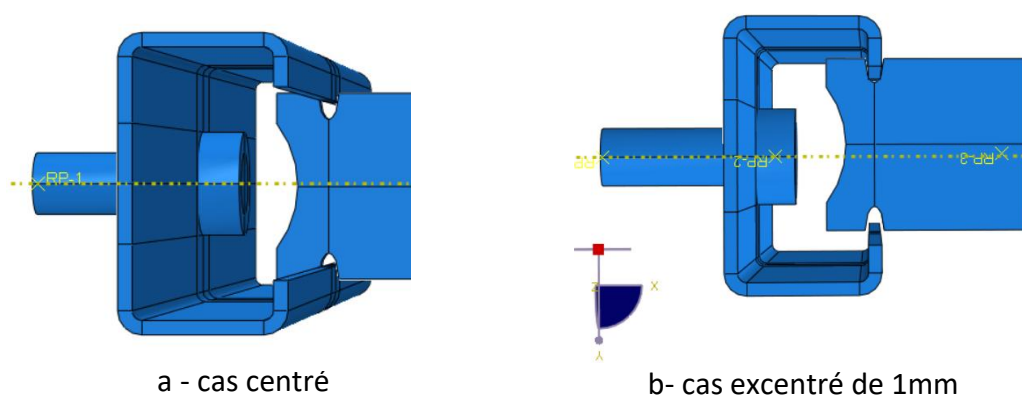


Figure 84 - Attache plate dans le rail centrée-excentrée

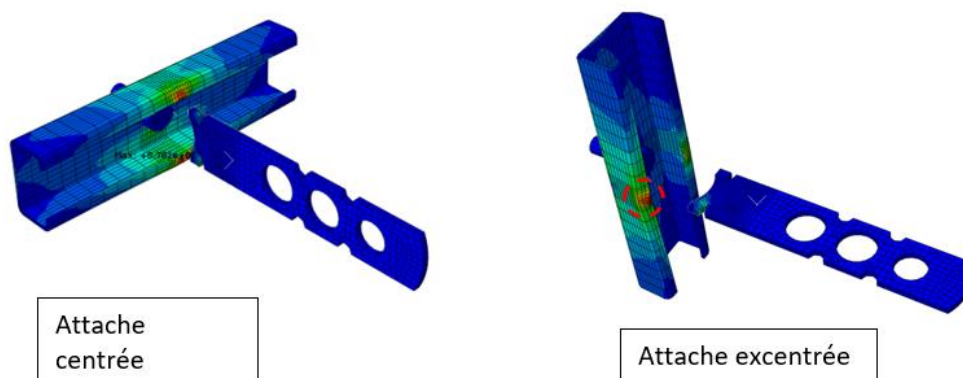


Figure 85 - Concentration des contraintes dans un coté du rail

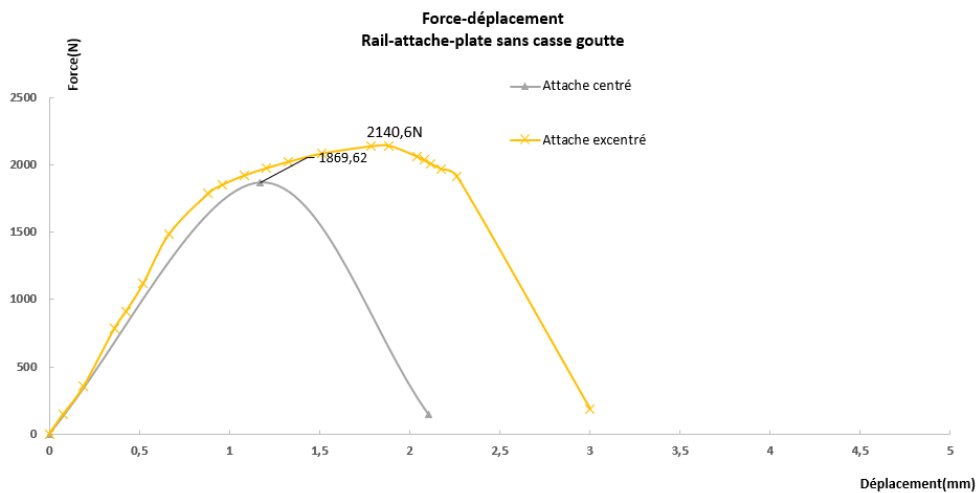


Figure 86 - Traction attache centré et excentré

Dans le cas où l'attache est excentrée par rapport au rail, nous observons que la contrainte maximale est localisée sur un seul côté du rail, indiquant une séparation progressive, avec d'abord un côté de l'attache qui se détache, suivi du second côté comme montré dans la Figure 85. Contrairement à l'attache centrée, une concentration de contraintes est observée au niveau de la surface de contact attache-rail.

La Figure 86 montre que, dans le cas de l'attache excentrée, la force maximale atteinte dans le cas centré correspond à la sortie de l'attache des deux côtés, tandis que dans le cas excentré, elle correspond à la sortie d'un seul côté uniquement. Cependant, le frottement nécessaire pour sortir l'attache est supérieur dans le cas excentré. En effet, dans le cas excentré, il est nécessaire de déformer le rail de manière plus importante, plus pour arriver à la sortie de l'attache. La différence de force entre les deux cas reste limitée, ce qui permet de considérer qu'un défaut d'excentrement dans la mise en place de l'attache ne risque pas d'entraîner une perte significative de résistance.

6.3.2. Attache plate en compression : influence du casse-goutte

Dans cette partie de l'étude, on étudie l'influence de la présence du casse-goutte sur la raideur et le comportement plastique de l'attache plate, en comparaison avec une attache sans casse-goutte.

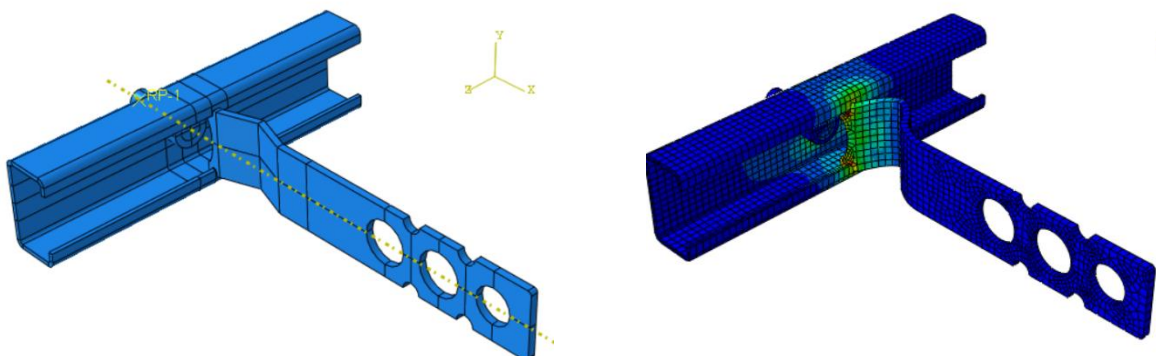


Figure 87 - Attache plate avec casse goutte et rail soumise à de la compression

Dans le cas de la compression de l'attache avec casse-goutte, un glissement vertical de l'attache par rapport au rail est observé, suivi d'un phénomène de flambement aggravé par le casse-goutte. La Figure 88 permet de comparer les comportements entre l'attache avec et sans casse-

goutte. Il est intéressant de noter une perte de résistance de l'ordre de 30%. Cependant, Le fait que l'attache vienne en butée sur le rail permet d'atteindre des niveaux de résistance supérieurs à la traction pour laquelle, l'attache se détache du rail.

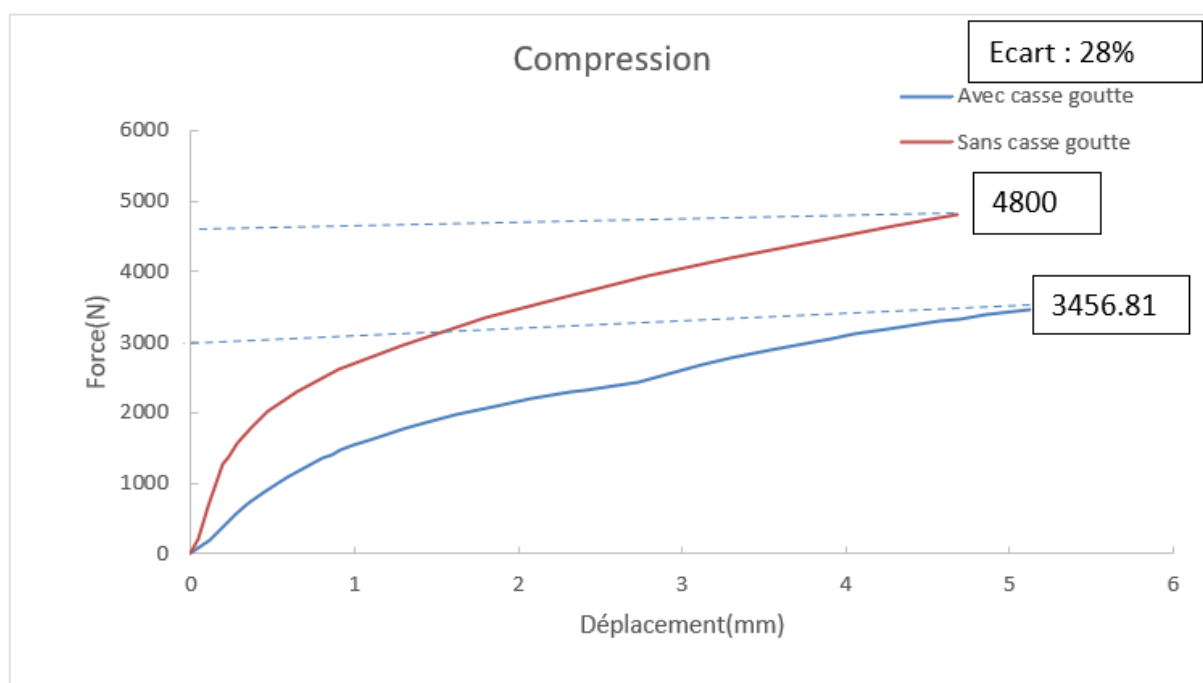


Figure 88 - Compression attache plate avec et sans casse goutte

6.3.3. Attache plate en compression : Défaut de planéité

Dans cette partie, on étudie l'influence d'une imperfection de l'attache plate avec une déformation initiale en arc de 0,15 mm ou de 1 mm (Figure 89) sur le comportement à la compression, et notamment le risque de flambement. Les résultats d'essais sont présentés à la Figure 90.

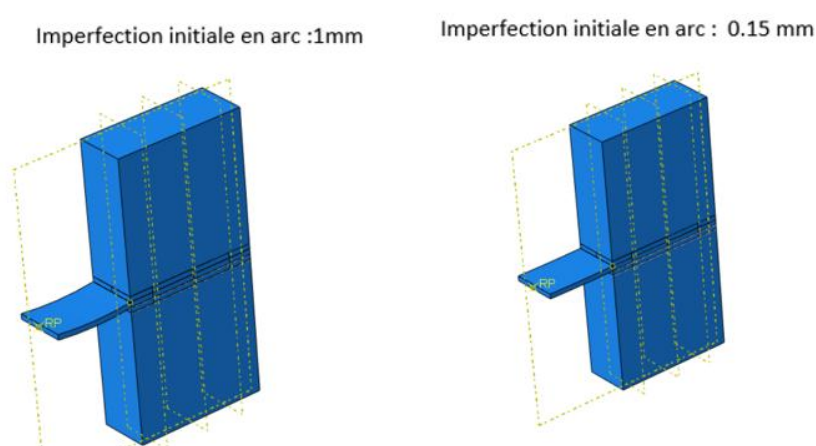


Figure 89 - Attache plate en compression

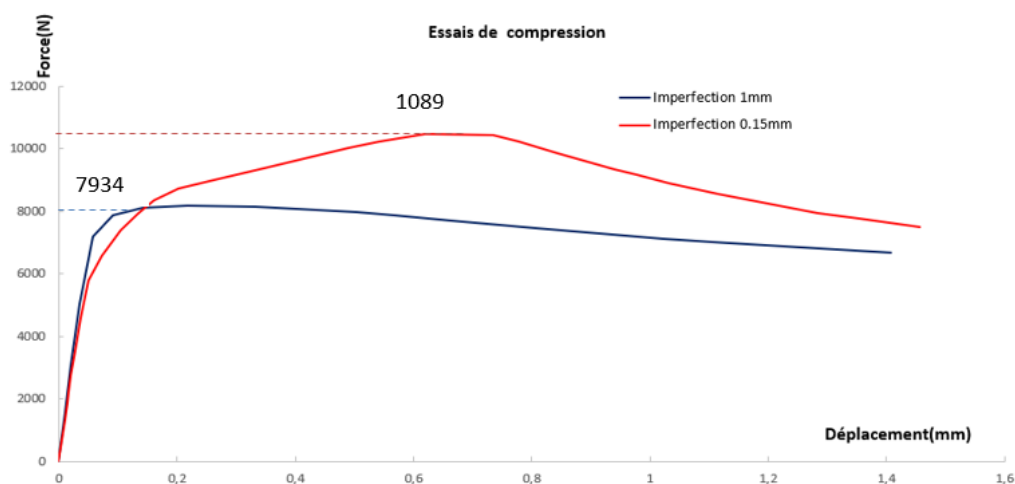


Figure 90 - Superposition des courbes numériques et des courbes expérimentales de l'essai de compression du modèle complet. (Attache plate)

L'attache avec un défaut plus faible atteint une force maximale plus élevée que celle avec un défaut de 1 mm, ce qui met en évidence l'influence significative du défaut de planéité sur le comportement du système.

6.3.4. Influence des paramètres mortier et/ou du modèle cohésif brique-mortier

Le module de Young du mortier PRB MJ VIF est modifié selon les valeurs présentées dans le Tableau 17 (section 5.6), en tenant compte des lois de comportement en contraintes vraies illustrées dans la Figure 91, ainsi que de la courbe d'endommagement du mortier PRB MJ VIF représentée dans la Figure 92. Les calculs présentés au préalable ont été réalisés avec une loi de mortier issue de résultats de la littérature. L'objectif de cette partie est de comparer cette loi (nommée modèle complet) avec des lois de comportement issues des expériences, afin d'évaluer la sensibilité du modèle pour des paramètres de mortier différents pour les essais de traction.

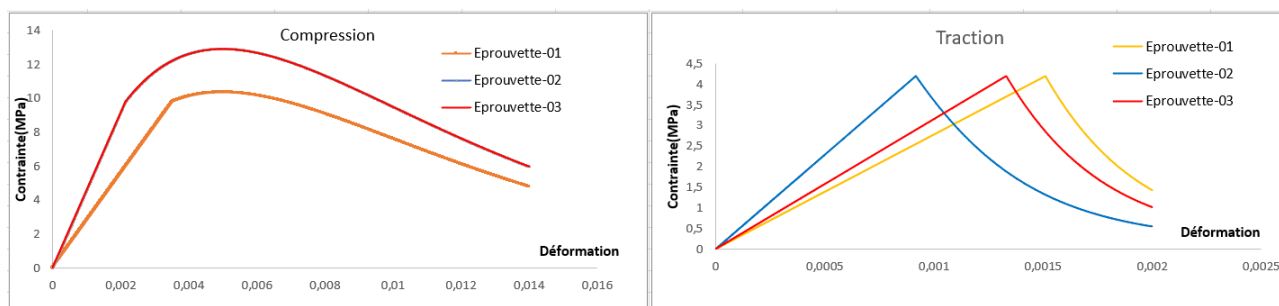


Figure 91 - Contraintes de compression et traction du mortier pour chaque éprouvette

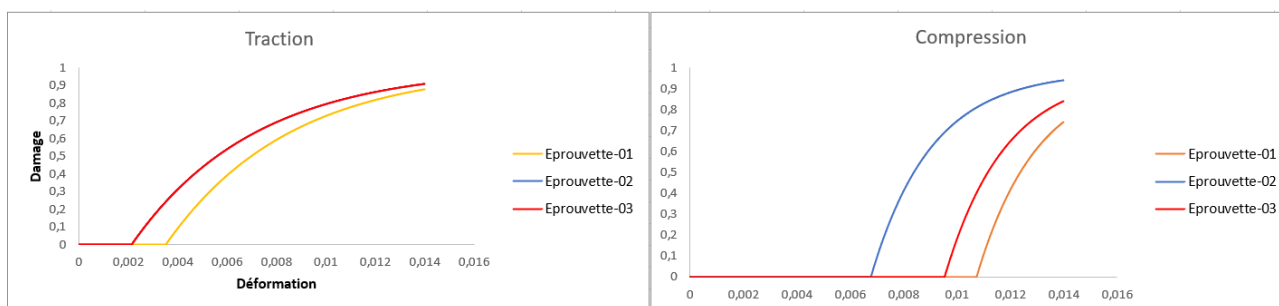


Figure 92 - Loi d'endommagement du mortier pour chaque éprouvette

La Figure 93 représente la courbe force-allongement pour le modèle complet et pour les 3 éprouvettes dont la loi de mortier a été modifiée. Le Tableau 33 compare les résultats obtenus avec l'ensemble des calculs.

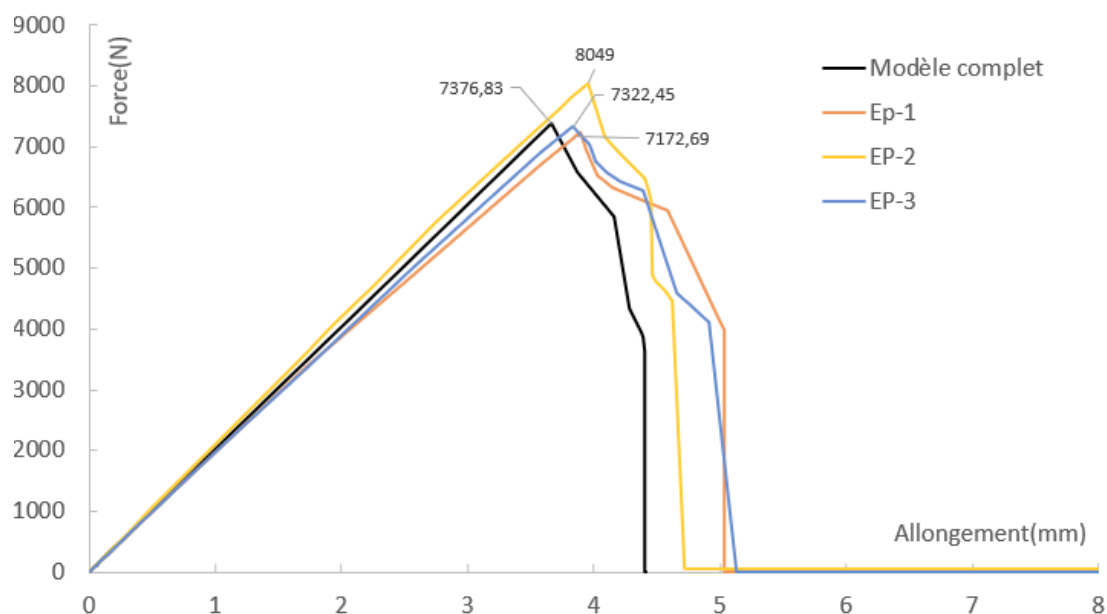


Figure 93 - Traction du modèle complet avec variation des paramètres du mortier

Tableau 33: Comparaison des forces et des raideurs des trois éprouvettes avec celles issues du modèle complet

	Force Max(N)	Comparaison modèle complet	Raideur(N/mm)	Comparaison modèle complet
Eprouvette-1	7131.94	-3,4%	1873.59	-2.96%
Eprouvette-2	8049	8,36%	2049.65	6.15%
Eprouvette-3	7322.45	-0.74%	1921.88	-0.46%
Modèle complet	7376.83		1930.81	

Le modèle de mortier issu de la littérature est relativement proche des lois obtenues par essais. En définitive, l'erreur de prédiction sur la force maximale et sur la raideur est inférieure à 10%.

7. Essais à grande échelle

7.1. Présentation du protocole global

Faute de référence normative, les essais ont été réalisés selon les protocoles décrits dans ce rapport, en se basant sur les normes suivantes :

- NF EN 1991-1-4 (Novembre 2005) : Eurocode 1 : actions sur les structures – Partie 1-4 : actions générales – Actions du vent [21]
- NF EN 12155 (Octobre 2000) : Façades rideaux – Détermination de l'étanchéité d'eau – Essai de laboratoire sous pression statique [44]
- NF EN 12179 (Octobre 2000) : Façades rideaux – Résistance à la pression du vent – Méthode d'essai [45]

La maquette d'essais est sollicitée par une succession de 4 essais différents :

- Un essai de vieillissement mécanique de déformation différentielle pour vérifier les conséquences des déformations différentielles entre maçonnerie et ossature bois.
- Un essai de vieillissement mécanique cyclique par une mise en parallélogramme de la maquette pour représenter les sollicitations réelles et de fatigue induites par des sollicitations de type vent.
- Un essai d'étanchéité à l'eau et de résistance au vent succédant aux sollicitations mécaniques.
- Un essai de déformation différentielle jusqu'à 30 mm de déplacement pour évaluer les conséquences des déformations différentielles dans des cas plus critiques

Pendant et après chaque essai, une vérification visuelle est effectuée pour identifier les éventuels désordres esthétiques et/ou d'étanchéités.

7.2. Description des maquettes

Comme indiqué au §3.7, deux types d'attaches et deux couples brique + mortier sont testés dans le cadre de cette étude :

Tableau 34 - Configurations testées sur les essais grande échelle

Maquette	Brique	Mortier	Attaches
1	Perforée	Joint épais	Filaires
2	Pleine	Joint semi-épais	Filaires
3	Perforée	Joint épais	Plates avec rail
4	Pleine	Joint semi-épais	Plates avec rail

Les plans des maquettes sont disponibles en Annexe.

La réalisation des maquettes d'essai est détaillée dans les rapports d'essais 403/23/0541/A-1-v1 [46], 403/23/0541/A-2-v1 [47], 403/23/0541/A-3-v1 [48] et 403/23/0541/A-4-v1 [49].

Une double goulotte est rapportée en pied du mur double, dans la lame d'air, afin de recueillir et dissocier les eaux de ruissellement provenant de la face intérieure (contre parement) du mur maçonné de celles du pare pluie. Ces eaux sont récoltées dans deux contenants différents et pesées en fin d'essais d'étanchéité à l'eau.



Figure 94 - Double goulotte en pied de mur dans la lame d'air

Par conséquent, les maquettes n'ont pas de joints non-garnis ou de grille d'aération en pied et en tête.

7.3. Essais de déformation différentielle

7.3.1. Principe de l'essai

Le principe de l'essai consiste à appliquer un chargement ascendant en partie supérieure dans le plan, appliqué à la COB préalablement désolidarisée du CLT, pour soumettre l'ensemble aux déformations différentielles.

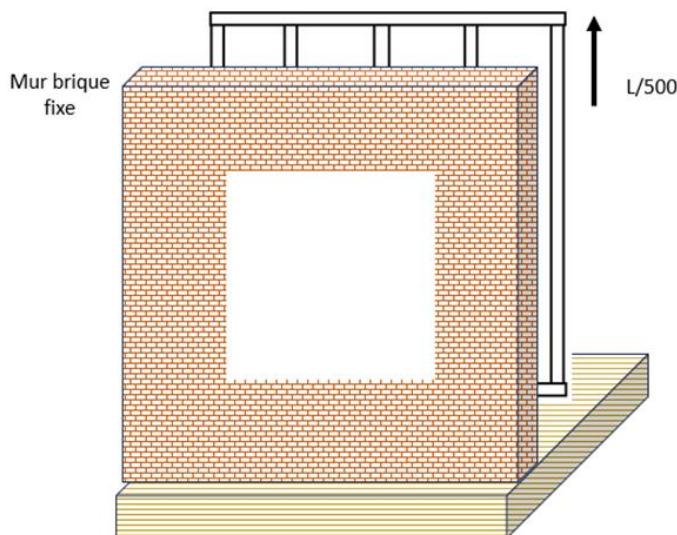


Figure 95 - Schéma de principe de l'essai

7.3.2. Machine d'essais

Les essais sont réalisés sur un banc d'essais hydraulique vertical piloté et asservi informatiquement, d'une capacité nominale de 250 kN par vérin. Ces vérins, synchronisés, sont de classe 1, c'est à dire que la force est mesurée avec une précision de 1 % sur la mesure.

7.3.3. Montage d'essai

La déformation est appliquée en partie supérieure par deux vérins synchronisés au droit des montants. Chaque vérin est équipé d'une plaque métallique de répartition afin d'exercer la charge sur la lisse haute du mur à ossature en bois.



Figure 96 - Montage de l'essai de déformation différentielle

La COB est renforcée avant essai avec des équerres E5 entre montants et traverses.

7.3.4. Chargement

Le cycle de déformations est défini comme suit :

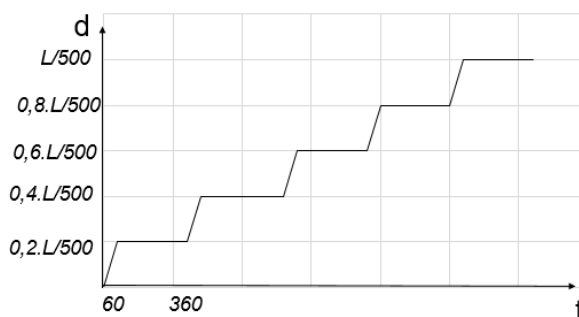


Figure 97 - Cycle de déformations par vérin

Une précharge de 20 daN est appliquée par vérin. La maquette d'essai subit ensuite 5 paliers de déformation jusqu'à une sollicitation en déformation maximale de $L/500$ au droit de chaque montant.

Chaque montée de palier se fait en 60s, le maintien de palier est de 300s minimum (temps nécessaire d'analyse d'éventuels désordres). Le dernier palier, à $L/500$, est maintenu pendant 2,5 heures.

7.3.5. Conditions limites

Les limites en déplacement sont définies ci - après, avec une longueur $H = 2400$ mm

Palier 1 : $0,2 \times L/500 = 0,96$ mm par vérin

Palier 2 : $0,4 \times L/500 = 1,92$ mm par vérin

Palier 3 : $0,6 \times L/500 = 2,88$ mm par vérin

Palier 4 : $0,8 \times L/500 = 3,84$ mm par vérin

Palier 5 : $1,0 \times L/500 = 4,80$ mm par vérin

7.3.6. Expression des résultats

Les résultats expérimentaux sont exprimés de la façon suivante :

F_{max} : Charge maximale (N), correspondant à la somme des efforts atteints par les deux vérins, pour chaque palier.

Un constat visuel est effectué après chaque palier, pour acter de la présence ou de l'absence de désordres esthétiques ou d'étanchéité.

7.4. Essais de vieillissement mécanique cyclique par une mise en parallélogramme

7.4.1. Principe de l'essai

Le protocole d'essai permet d'appliquer à la COB, les déformations vues par celle-ci par un chargement en tête dans le plan, qui possède un degré de liberté, permettant des mouvements horizontaux en compression et en traction.

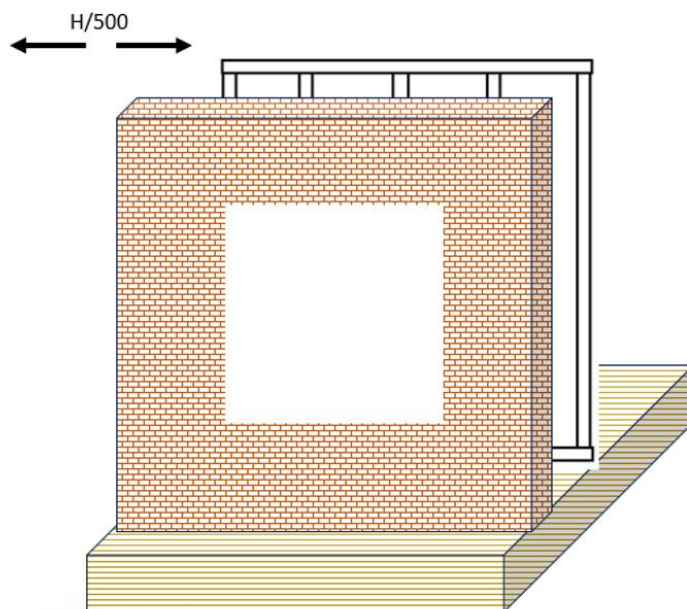


Figure 98 - Schéma de principe de l'essai de vieillissement mécanique cyclique de mise en parallélogramme

7.4.2. Machine d'essais

Les essais sont réalisés sur un banc d'essais hydraulique vertical piloté et asservi informatiquement, d'une capacité nominale de 250 kN. Le vérin est de classe 1, c'est à dire que la force est mesurée avec une précision de 1 % sur la mesure.

7.4.3. Montage d'essai



Figure 99 - Maquette d'essai avec baie pour l'essai de vieillissement mécanique cyclique

La maquette d'essai est ancrée au sol par le biais d'équerres pour éviter tout glissement et/ou soulèvement. Les sollicitations sont appliquées en tête du mur ossature bois par l'intermédiaire d'une ferrure reliée au vérin.

Le mur maçonné est contraint par un encadrement en bois afin de limiter les effets de bords.

7.4.4. Cycle de déformations

Le cycle de déformations est défini comme suit :

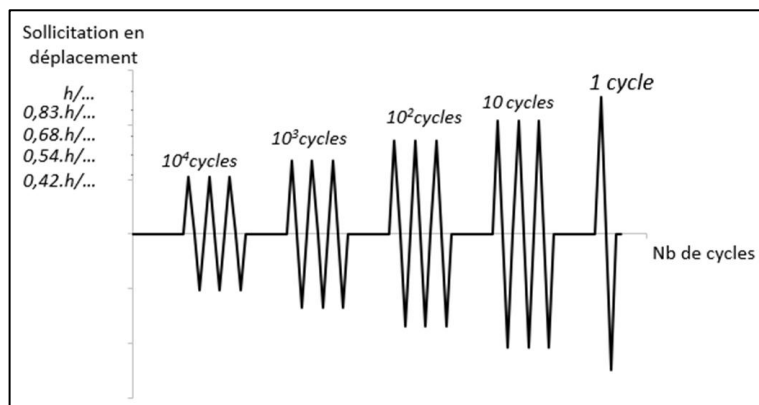


Figure 100 - Cycle de déformations

La fréquence des cycles est définie à 1 Hz pour 1, 10, 100, 1000 et 10 000 cycles.

7.4.5. Conditions limites

Les limites en déplacement sont définies ci - après, avec h = 2400 mm :

Pour 10000 cycles : $0,42 \times h/500 = 2,02 \text{ mm}$

Pour 1000 cycles : $0,54 \times h/500 = 2,59 \text{ mm}$

Pour 100 cycles : $0,68 \times h/500 = 3,26 \text{ mm}$

Pour 10 cycles : $0,83 \times h/500 = 3,98 \text{ mm}$

Pour 1 cycle : $1,00 \times h/500 = 4,80 \text{ mm}$

7.4.6. Expression des résultats

Les résultats expérimentaux sont exprimés de la façon suivante :

F_{max} : Charge maximale (N), correspondant à l'effort de traction (+) et compression (-) obtenue pour chaque limite de déplacement (séquence de cycles).

Un constat visuel est effectué et noté après chaque niveau de cycles pour acter de la présence ou de l'absence de désordres esthétiques ou d'étanchéité.

7.5. Essais d'étanchéité à l'eau et de résistance à la charge due au vent

7.5.1. Principe de l'essai

Le principe de l'essai consiste à soumettre le mur double à des essais eau et vent afin de vérifier son étanchéité à l'eau et à sa résistance au vent suite aux sollicitations mécaniques réalisées préalablement.

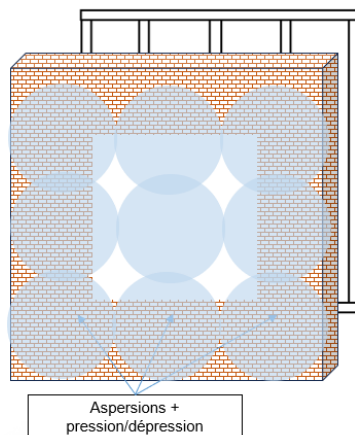


Figure 101 - Schéma de principe de l'essai

7.5.2. Séquence d'essais

La maquette d'essai a subi successivement :

- Un essai d'étanchéité à l'eau
- Un essai de résistance à la charge due au vent -
- Un essai de contrôle de l'étanchéité à l'eau
- Un essai de résistance à la charge due au vent avec une charge de vent accrue - sécurité

7.5.3. Montage d'essais

Le montage est décrit précisément dans les rapports d'essais 403/23/0541/A-1-v1, 403/23/0541/A-2-v1, 403/23/0541/A-3-v1 et 403/23/0541/A-4-v1.

7.5.4. Essai d'étanchéité à l'eau

Le mode opératoire de cet essai se base sur la norme NF EN 12155 [44].

Un système d'arrosage est réalisé à l'aide de rampes de buses à jet coniques pleins (120°), espacées entre elle de 400mm en largeur et 1500mm en hauteur, réparties face au revêtement extérieur, à 250mm du plan de la maquette à arroser, de manière à former un film d'eau continu et sous pression cyclique sur la maquette. L'inclinaison des buses est réglée pour permettre une aspersion horizontale.

Ce dispositif permet un débit d'eau de 2 L/(m².min) de manière à appliquer un film constant et continu sur la surface extérieure de la maquette.

7.5.4.1. Cycles d'aspersion

Les cycles de pression sont définis comme suit, basés sur la norme NF EN 12154 [50] jusqu'à une pression maximale P_{\max} de 460Pa.

Tableau 35 : Cycles d'aspersion de l'essai d'étanchéité à l'eau

Paliers de pression (Pa)	Durée de l'essai (min)	Débit d'arrosage (l/min.m ²)
0	15	2
50	5	2
100	5	2
150	5	2
200	5	2
300	5	2
460	5	2

7.5.4.2. Expression des résultats

Pendant toute la durée d'arrosage, la maquette est observée de manière à déceler les éventuelles fuites d'eau.

Entre chaque phase d'essai, la partie haute du caisson est démontée afin de visualiser la lame d'air, les attaches et les zones exposées à l'eau.

En fin d'essai, les contenants servant à récolter les eaux sont pesées. Un démontage du caisson en partie supérieure est effectué afin d'apprécier la présence ou non de zones d'humidification en contre parement du mur maçonnée et/ou, sur le pare-pluie.

7.5.5. Essai de résistance à la charge due au vent

Le mode opératoire de cet essai se base sur la norme NF EN 12179 [45].

La maquette d'essai est soumise à la pression en quatre paliers d'une durée minimale de (15 ± 5) s jusqu'à la charge de vent théorique déclarée, c'est-à-dire à 25%, 50%, 75% et 100% de cette charge théorique.

Ces paliers sont effectués en pression positive puis en pression négative.

7.5.5.1. Paliers de pression

Les paliers de pression sont définis comme suit, avec une charge de vent théorique déclarée P_{\max} de 1840 Pa.

Tableau 36 : Cycles de pression de l'essai de résistance à la charge due au vent

Paliers de pression (Pa)	Durée de l'essai (s)
0	15
25% P_{\max} = 460 Pa	15
50% P_{\max} = 920 Pa	15
75% P_{\max} = 1380 Pa	15
100% P_{\max} = 1840 Pa	15

7.5.5.2. Expression des résultats

Pendant toute la durée de l'essai, la maquette est observée de manière à déceler les éventuelles dégradations.

7.5.6. Essai de résistance à la charge due au vent avec une charge au vent accrue

Une charge accrue de vent est appliquée pendant (15 ± 5) s sur la maquette d'essai, en pression positive et en pression négative égale à 150% P_{\max} , soit 2760 Pa.

En fin d'essai, les éventuels changements de l'état de la maquette d'essai sont relevés.

7.6. Essai de déformation différentielle jusqu'à un déplacement de 30 mm

Les essais sont identiques à ceux décrits dans le §7.3, à l'exception faite du cycle de chargement. Une précharge de 20 daN est appliquée par vérin. La maquette d'essai subit ensuite des paliers successifs à un déplacement de 2 mm jusqu'à une sollicitation maximale d'un déplacement de 30 mm au droit de chaque montant.

Chaque montée de palier se fait en 60s, le maintien de palier est de 30s. L'essai est arrêté manuellement après un déplacement de 30 mm.

7.7. Instrumentation – mesures

Les essais ont été réalisés à l'aide de vérins 25t. L'extrémité des vérins est équipée d'un capteur d'effort et d'un capteur de déplacement. La charge et le déplacement aux points d'applications des efforts sont donc enregistrés.

En parallèle des mesures au niveau des vérins, une caméra rapide a été utilisée pour mesurer les déplacements en différents points de la maquette. La méthode se base sur l'identification de cibles posées collées sur la maquette grâce à une analyse de contraste. Pour effectuer ces mesures les étapes suivantes sont nécessaires.

Calibration

Les lentilles optiques projettent l'image sur un plan avec un certain angle. Plus l'angle d'ouverture de la caméra est grand, plus l'image résultante sera déformée (effet fish-eye des Go-pro par exemple). De façon à minimiser ces distorsions qui entraîne une mauvaise appréciation des déplacements, un faible angle d'ouverture est choisi et les distorsions de la caméra sont corrigés à l'aide d'un damier de calibration. Un assemblage de photo du damier à différents endroit de l'image va permettre de créer une matrice de distorsion de façon à corriger les images

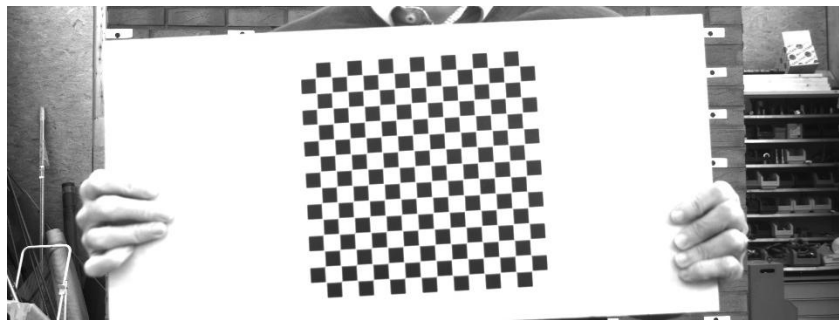


Figure 102 - Damier de calibration - A partir d'une série d'image de calibration, il est possible de créer une matrice de distorsion permettant de corriger chaque image pour que les lignes du damier soient bien droites.

Grossissement et perspective

De façon à pouvoir mesurer des déplacements, il est nécessaire de connaître le ratio liant la taille d'un pixel de l'image à des millimètres. Pour cela un QR Code dont les dimensions sont connues est positionné sur le plan du mur. Un algorithme de détection des QR Code est utilisé pour le repérer et mesurer sa taille en pixel, ce qui permet d'obtenir le grossissement, c'est-à-dire le ratio mm/pixel de l'image.

En fonction de la position des coins du QR code, il est possible de corriger la perspective de l'image qui pourrait être dû par exemple à un positionnement de la caméra qui ne serait pas perpendiculaire au mur testé.

Identification des cibles et mesure du déplacement

Le traitement des images est réalisé à l'aide du logiciel libre ImageJ avec l'extension Fiji. Le suivi des cibles utilise le plugin TrackMate. Le logiciel détecte l'emplacement des cibles sur chaque image à l'aide d'un algorithme de détection de contraste (Hessian detector). Ensuite, un deuxième algorithme (simple LAP tracker) est utilisé pour créer des chemins (track) qui relient des points appartenant à des images successives. Un exemple est donné Figure 103.

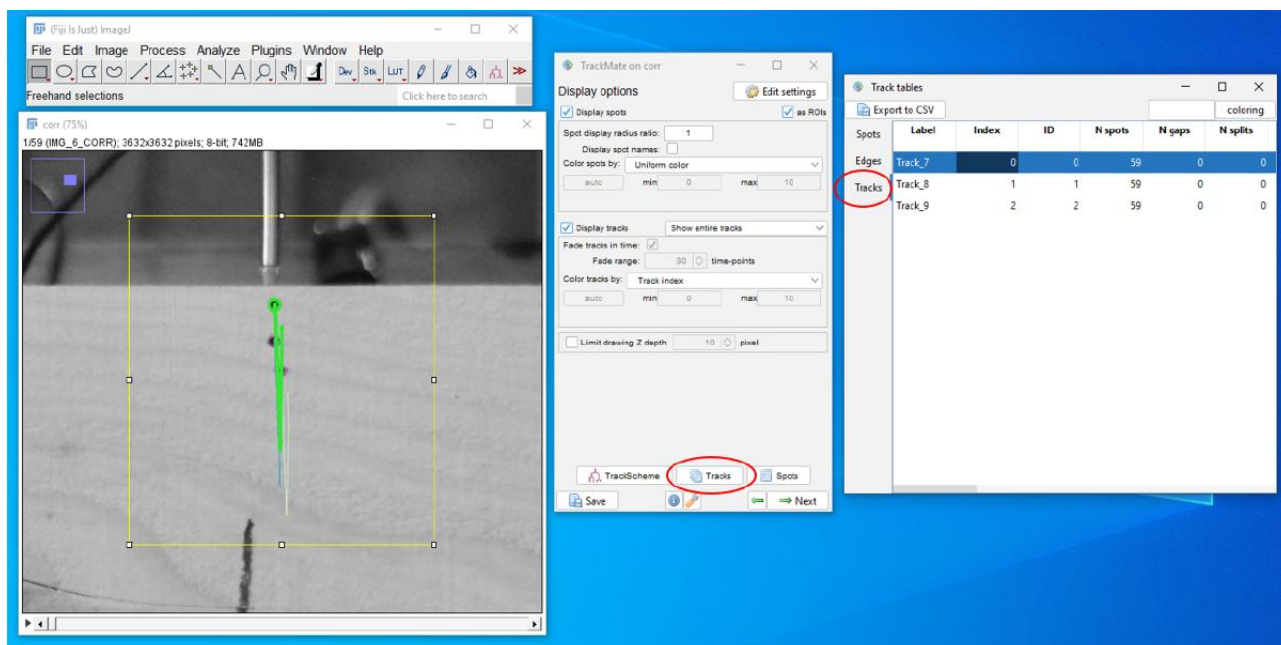


Figure 103 – Obtention de chemin qui contiennent la position d'un point dans toute la séquence d'un essai.

Il est alors possible d'extraire le déplacement en fonction du temps d'un point particulier de l'image ou de tracer le champ de déplacement de toute la structure durant la durée de l'essai.

7.8. Résultats des essais avec attaches filaires

7.8.1. Déformations différentielles

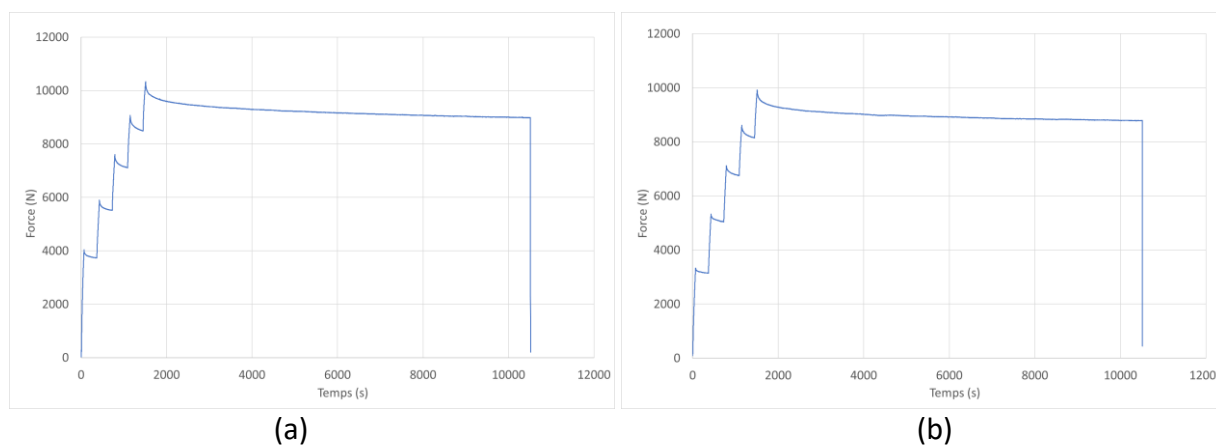


Figure 104 - Courbe force-temps – attaches filaires - briques perforées (a) et briques pleines (b)

Le mur double est amené progressivement à une déformation différentielle de 4,8 mm entre ossature bois et mur maçonné.

Les attaches filaires, vissées côté bois et prises dans le mortier côté maçonnerie, sont sollicitées lors de cet essai. L'effort repris pour une déformation différentielle de 4,8mm est de l'ordre de 9 000N. Le comportement est similaire entre briques pleines et briques perforées.

La Figure 105 présente les trajectoires des points du murs durant l'essai. Le mur double avec les attaches filaires a un déplacement globalement vertical et d'amplitude très faible. Néanmoins les attaches filaires transmettent un effort vertical à la paroi maconnée, ce qui se traduit par un déplacement vertical quasi-homogène des points du mur d'environ 1mm. Le cadre métallique suite le déplacement de la COB et a donc un déplacement beaucoup plus important.

En isolant un point particulier (au milieu du mur, au dessus du cadre) on observe que le mur suit les incréments de déplacement de la COB, mais de façon largement amoindrie (Figure 106). Le niveau de déplacement est globalement constant au cours du temps sur la dernière partie de l'essai, ce qui ne permet pas d'identifier un éventuel phénomène de fluage ou de relaxation.



Figure 105 - Déplacement d'ensemble de la maquette pendant l'essai de déformation différentielle - attaches filaires, brique pleine

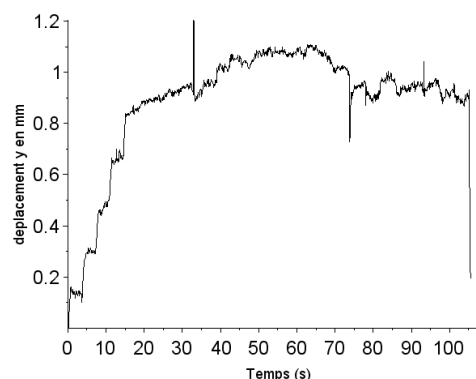


Figure 106 - Déplacement du point n°6 au cours de l'essai (entouré en orange)

7.8.2. Mise en parallélogramme cyclique

Les essais de mise en parallélogramme induisent un cisaillement de la COB, ce qui se visualise aussi dans la prise de vue des trajectoires (Figure 107). On observe un déplacement très faible sur la zone inférieure de la maquette, ce qui traduit un blocage des appuis quasi-parfait. Le mur subit une rotation avec pour centre l'ouverture plutôt que du cisaillement pur. La raideur des connecteurs explique ce phénomène. La Figure 106 présente le déplacement en fonction du temps du point 42 lors des derniers cycles. Le point 42 est situé en haut à droite du mur et est entouré en orange. Le déplacement de la maçonnerie suit celui du signal d'entrée, avec une réduction importante d'amplitude (environ deux fois moins) ce qui traduit une déformation des attaches.



Figure 107 - Déplacement d'ensemble de la maquette pendant l'essai de mise en parallélogramme - attaches filaires, briques perforées

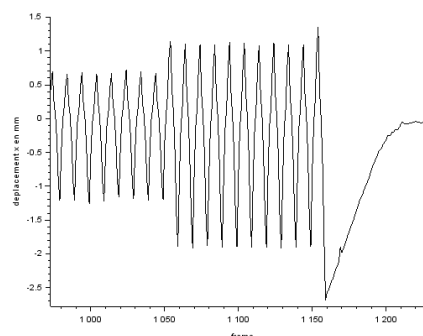


Figure 108 - Déplacement du point n°42 en fin d'essai (entouré en orange)

7.8.3. Etanchéité à l'eau et résistance au vent

7.8.3.1. Etanchéité à l'eau

Tableau 37 : Conditions et Résultats de l'essai d'étanchéité à l'eau – attaches filaires et briques perforées

Pression (Pa)	Durée (min)	Observations	Volume d'eau récupéré en fin d'essai dans la double goulotte	
			Pare-pluie (L)	Mur maçonné (L)
0	15	RAS	0,06	0,69
50	5			
100	5			
150	5			
200	5			
300	5			
460	5			

Les résultats sont présentés pour la configuration avec briques perforées et attaches filaires. Les volumes d'eau n'ont pas pu être recueillis pour la configuration avec briques pleines et attaches filaires du fait d'un défaut d'étanchéité sur le panneau de fermeture.

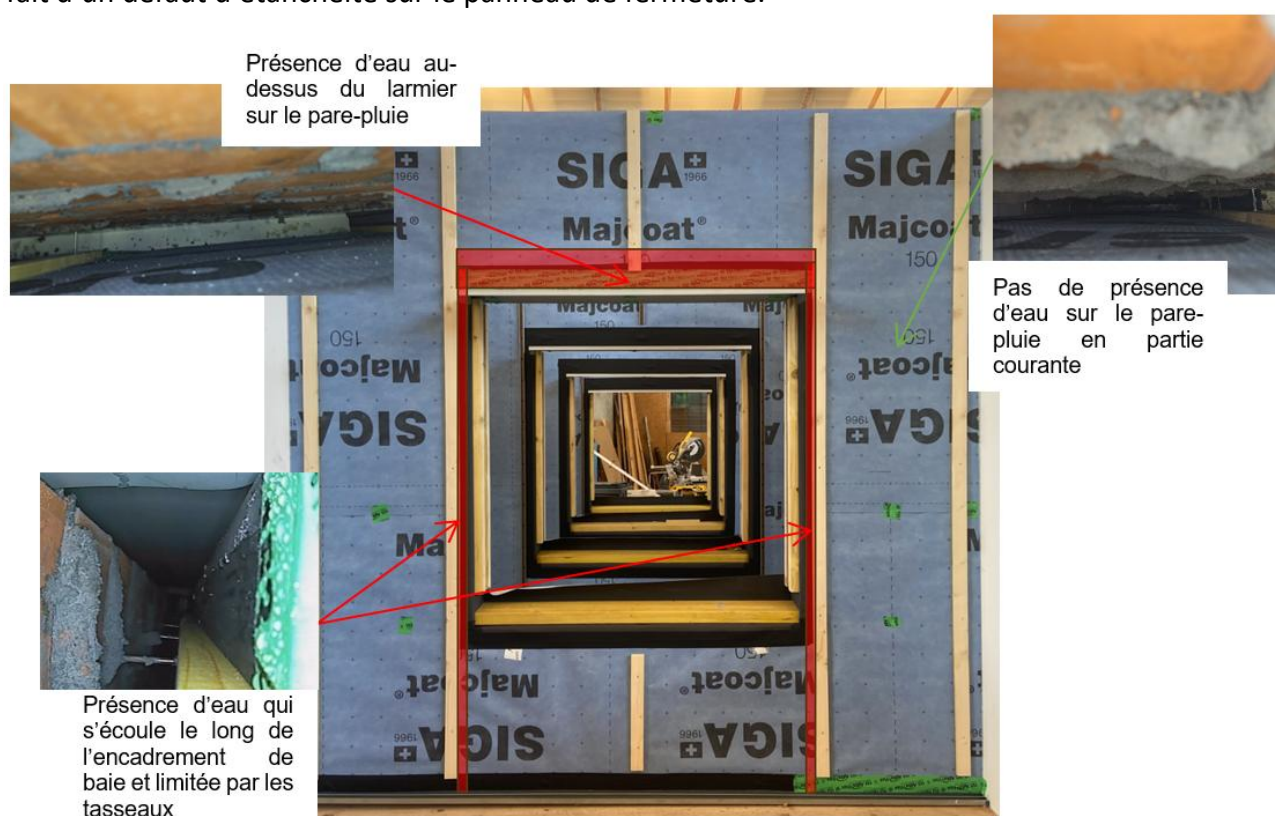


Figure 109 - Résultats de l'essai d'étanchéité à l'eau – attaches filaires

Les constats réalisés en Figure 109 sont valables pour les deux configurations avec attaches filaires.

7.8.3.2. Résistance au vent

Les sollicitations de vent en pression/dépression n'amènent pas de déformation des attaches filaires.

Les essais qui suivent en contrôle d'étanchéité à l'eau montrent des résultats similaires au premier essai d'étanchéité à l'eau.

Aucune détérioration, ni déformation permanente n'est constatée à l'issue de l'essai de résistance au vent sous charge accrue.

7.8.4. Déformations différentielles jusqu'à 30 mm

La maquette a ensuite été soumise à un essai jusqu'à un déplacement différentiel de 30 mm entre ossature bois et maçonnerie (Figure 110).

Le déplacement de la partie maçonnée (en rouge) demeure très faible comparativement au déplacement de l'ossature bois, qui est majoritairement transmis au cadre métallique (en vert). L'effort reste vertical et sans à-coup, ce qui ne permet pas d'observer une rupture fragile sur la menuiserie.



Figure 110 - Essais de déformation différentielle jusqu'à 30mm - attaches filaires, briques perforées

7.9. Résultats des essais avec attaches plates

7.9.1. Déformations différentielles

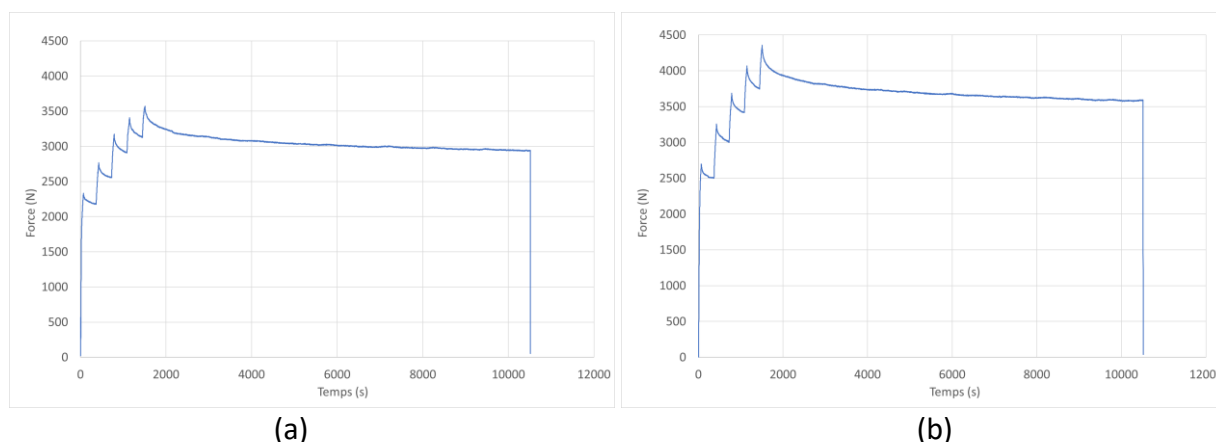


Figure 111 - Courbe force-temps – attaches plates - briques creuses (a) et briques pleines (b)

Le mur double est amené progressivement à une déformation différentielle de 4,8 mm entre ossature bois et mur maçonné.

Les attaches plates, logées dans les rails côté bois et ancrées dans le mortier côté maçonnerie, sont sollicitées de manière limitée lors de cet essai. L'effort repris pour une déformation différentielle de 4,8mm est de l'ordre de 3 500N (ce qui correspond globalement la masse de l'ossature bois).

Le comportement est similaire entre briques pleines et briques perforées.

La Figure 112 présente les trajectoires des points du murs durant l'essai. Le mur double avec les attaches plates présente des déplacements très bruités et pas nécessairement verticaux. Par exemple le point 50 situé en haut du mur présente un déplacement légèrement biais. On observe aussi des déplacements locaux particuliers (point 40, 46 ou 53 par exemple) qui pourrait traduire soit des endommagements locaux, soit une hétérogénéité de paramètres. Les attaches plates ne transmettent pas d'efforts verticaux à la maçonnerie, ce qui explique le très faible déplacement mesuré, ainsi que son caractère bruité. Les déplacements sont en général inférieurs au mm.

A l'exception d'un incrément de déplacement initial, il est difficile de corréler les résultats de déplacement avec la valeur de déplacement du vérin qui sollicite la COB. Cela traduit bien le fait que pratiquement aucun effort n'est transmis par les attaches entre la COB et la maçonnerie.

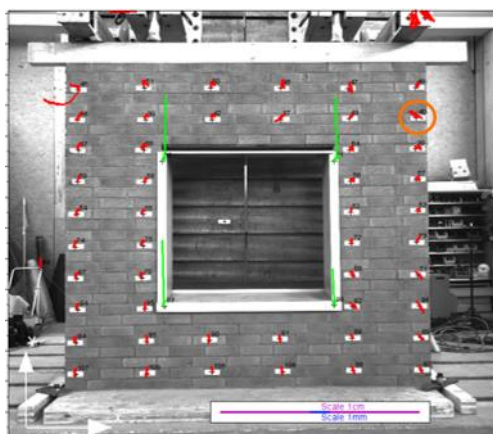


Figure 112 - Déplacement d'ensemble de la maquette pendant l'essai de déformation différentielle - attache plate, brique perforée

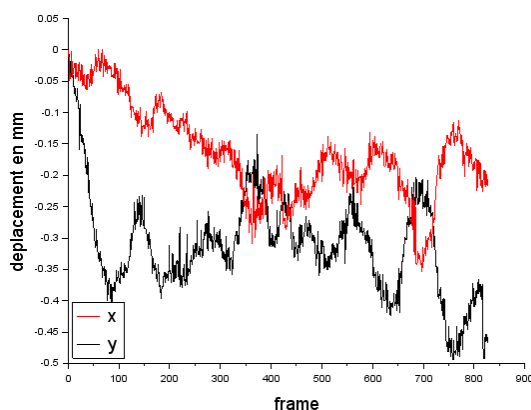


Figure 113 - Déplacement du point n°40 au cours de l'essai

Par rapport aux résultats d'essais avec attaches filaires présentés à la Figure 105, les déplacements de la maçonnerie sont quasiment nuls. L'attache permet bien le glissement vertical entre l'ossature bois et la partie maçonnée.

7.9.2. Mise en parallélogramme

On retrouve le même profil de déplacement pour le mur double avec les attaches plates et pour celui avec les attaches filaires. La sollicitation engendre une rotation de la maçonnerie, mais avec des niveaux très faibles. Les déplacements sont légèrement plus faibles (Figure 114) et plus dans l'axe de l'horizontal que les essais avec les attaches filaires ce qui indique probablement une raideur un peu plus faible de l'ouvrage utilisant des attaches plates. La mesure au même point que pour les essais avec les attaches filaires (Figure 115) indique une amplitude de déplacement un peu plus faible que pour les essais avec les attaches filaires (Figure 108).

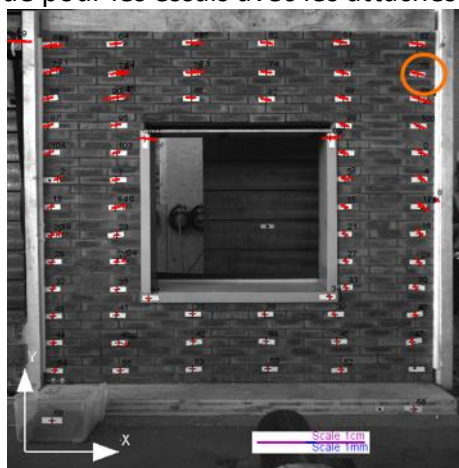


Figure 114 - Déplacement d'ensemble de la maquette pendant l'essai de mise en parallélogramme - attache plate, brique perforée

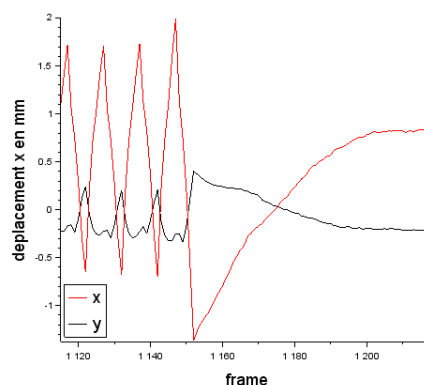


Figure 115 - Déplacement du point n°78 au cours de l'essai

7.9.3. Etanchéité à l'eau et résistance au vent

7.9.3.1. Etanchéité à l'eau

Pression (Pa)	Durée (min)	Observations	Volume d'eau récupéré en fin d'essai dans la double goulotte	
			Pare-pluie (L)	Mur maçonné (L)
0	15	RAS	0,89	0,02
50	5			
100	5			
150	5			
200	5			
300	5			
460	5			

Tableau 38 et 39 : Conditions et Résultats de l'essai d'étanchéité à l'eau – attaches filaires briques perforée

Les résultats sont présentés pour la configuration avec briques perforée et attaches filaires. Les volumes d'eau n'ont pu être recueillis pour la configuration avec briques pleines et attaches plates dû à un défaut d'étanchéité sur le panneau de fermeture.

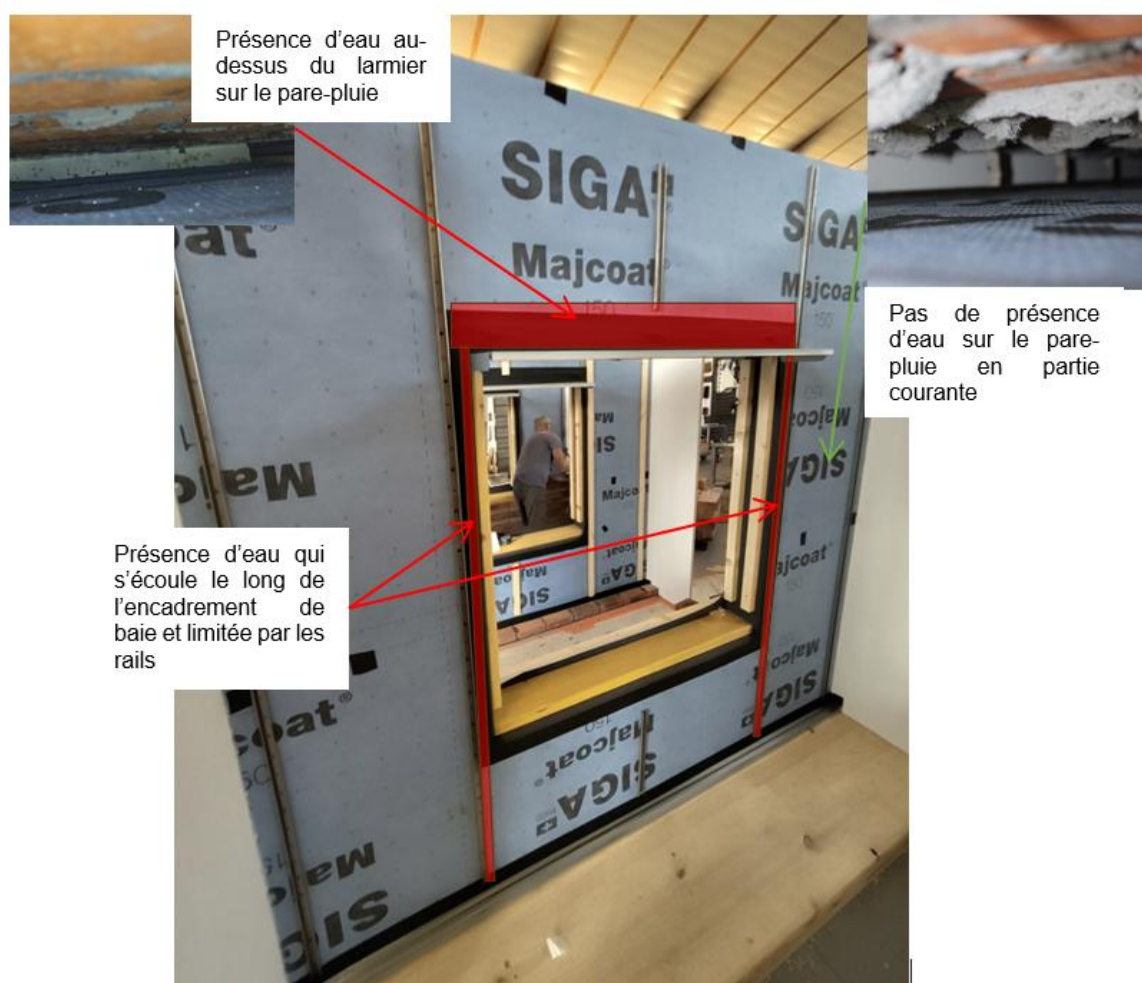


Figure 116 - Résultats de l'essai d'étanchéité à l'eau – attaches plates

Les constats réalisés en Figure 116 sont valables pour les deux configurations avec attaches plates.

7.9.3.2. Résistance au vent

Les sollicitations de vent en pression/dépression n'amènent pas de déformation des attaches filaires.

Les essais qui suivent en contrôle d'étanchéité à l'eau montrent des résultats similaires au premier essai d'étanchéité à l'eau.

Aucune détérioration, ni déformation permanente n'est constatée à l'issue de l'essai de résistance au vent sous charge accrue.

7.9.4. Déformations différentielles jusqu'à 30 mm

La maquette a ensuite été soumise à un essai jusqu'à un déplacement différentiel de 30 mm entre ossature bois et maçonnerie (Figure 117).

Les déplacements de la maçonnerie restent quasiment nuls, même pour les essais ayant été prolongés jusqu'à 30 mm. L'attache permet bien le glissement vertical entre l'ossature bois et la partie maçonnée.

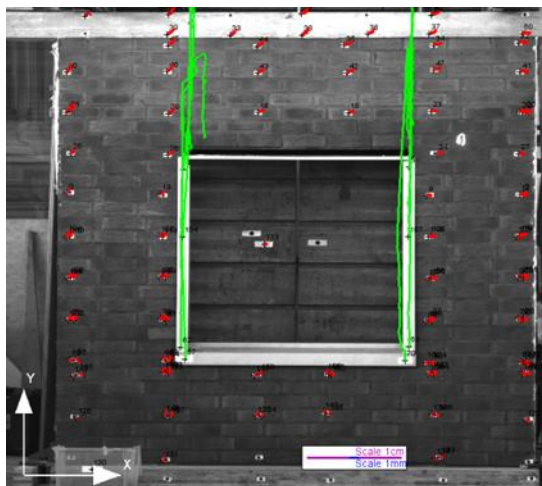


Figure 117 - Essais de déformation différentielle jusqu'à 30mm - attaches plates, brique perforée

7.10. Interprétation et analyse

7.10.1. Essais de déformations différentielle et de mise en parallélogramme

Les attaches plates coulisent dans le rail lors de l'essai de déformation différentielle permettant une liberté de mouvement dans ce plan. Les attaches filaires se plient légèrement sans dégradation du mortier ou des tasseaux ni apparition de fissures.

Les attaches n'ont pas été dégradées, que ce soient les attaches filaires ou plates dans le rail lors des essais de mise en parallélogramme.

Les quatre configurations testées n'ont montré ni fissuration ni dégradation après les essais de vieillissement mécaniques (déformation différentielle et mise en parallélogramme). L'ensemble des maquettes a ainsi pu passer aux essais d'étanchéité à l'eau et de résistance à la charge due au vent.

7.10.2. Essais d'étanchéité à l'eau et de résistance au vent

L'objectif de l'essai de résistance à la pluie battante est de vérifier que les sollicitations mécaniques lors des essais de déformation différentielle et de mise en parallélogramme n'ont pas remis en cause l'étanchéité du système, pour des dommages qui n'auraient pas pu être identifiés lors des contrôles visuels mentionnés ci-dessus.

Après essai, les ouvertures pratiquées montrent la présence de quelques traces d'eau. Ces traces sont néanmoins peu nombreuses et présentes le long de l'encadrement de baie jusqu'au tasseau ou rail (voir les zones sur Figure 109 et Figure 116).

Tableau 40 - Volumes d'eau projeté sur la maquette au cours de l'essai (L)

Écart de pression (Pa)	Intervalle de temps (min)	Volume total d'eau projeté(L)
0	15	172,8
50	5	57,6
100	5	57,6
150	5	57,6
200	5	57,6
300	5	57,6
460	5	57,6

Tableau 41 - Volume d'eau récupéré dans les goulottes et comparaison au volume total projeté

	Volume d'eau récupéré en fin d'essai dans la double goulotte (L)	Pourcentage du Volume total projeté
Contre-parement	< 1	< 2 %
Pare-pluie	< 1	< 2 %

Mise en perspective des quantités d'eau reçues sur le pare-pluie pendant l'essai

La quantité d'eau aspergée sur les maquettes lors de l'essai est de 2 Litres par m² et par min. Sachant que 1L/m² est équivalent à 1 mm de hauteur d'eau, la maquette, au cours que l'essai reçoit l'équivalent de 2 mm/min soit 120 mm/h.

Comme vu dans le Tableau 41, l'eau récoltée sur le pare-pluie représente moins de 2 % donc moins de 2,4 mm/h et moins de 1,8mm au cours de l'essai (45 minutes).

Une première comparaison peut être faite avec l'exigence de résistance à la pénétration de l'eau pour les membranes pare-pluie définie par la partie 1-2 du NF DTU 31.2, qui est de type W1 y compris après vieillissement, sur la base d'un essai réalisé selon la norme NF EN 13859-2 §5.2.3. Les essais suivant cette norme sont réalisés avec une colonne d'eau de 200 mm appliquant une pression sur la surface de l'éprouvette maintenue pendant 2h.

On constate donc que les 1,8 mm maximums que voit le pare-pluie au cours de l'essai d'étanchéité à l'eau sont négligeables.

Une autre comparaison peut être faite avec la réalité « météo ».

Quelques exemples de moyennes mensuelles annualisées (période 1976-2005) :

- Brest : 13 jours de pluie mensuels et 87 mm mensuels
- Quimper : 13 jours de pluie mensuels et 91 mm mensuels
- Aurillac : 12 jours de pluie mensuels et 120 mm mensuels
- Annecy : 11 jours de pluie mensuels et 115 mm mensuels
- Chambéry : 11 jours de pluie mensuels et 120 mm mensuels

- •Lons-le Saunier : 12 jours de pluie mensuels et 109 mm mensuels
- •Belfort : 13 jours de pluie mensuels et 94 mm mensuels
- •Tulle : 11 jours de pluie mensuels et 101 mm mensuels
- •Pau : 12 jours de pluie mensuels et 102 mm mensuels

Sources des données météo analysées pour les pluies moyennes :

<https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/indices-mensuels-de-precipitations-et-nombre-de-jours-de-precipitations-issus-du-modele-aladin-climat/> et https://mtmx.github.io/blog/carto_meteo/

Les 90 mm d'eau que voit la maquette pendant les 45 minutes de l'essai peuvent donc être corrélés à ces valeurs qui correspondent plutôt à une moyenne mensuelle, qui permettrait donc en réalité un séchage entre deux épisodes de pluie.

Ces constats et analyses permettent de conclure que la contribution du parement à l'étanchéité à l'eau peut être assurée après sollicitations mécaniques, jusqu'à une pression de pluie battante de 460 Pa correspondant à une hauteur de bâtiment de 10m.

Enfin, la présence de joints non garnis dans la réalité aura un impact positif afin d'évacuer l'eau vers l'extérieur. Cette étude nous aura permis d'objectiver les volumes d'eau présents dans la lame d'air en les mesurant en cas de pluie battante.

Aucune dégradation n'a été constatée lors des essais de résistance au vent. Les essais de contrôle d'étanchéité à l'eau montrent des résultats similaires au premier essai du même type.

Aucune dégradation n'a été constatée lors des essais de résistance sous charge de vent accrue (sécurité).

7.10.3. Essai de déformation différentielle jusqu'à 30 mm

Un essai de déformation différentielle importante (jusqu'à 30mm) a été réalisé sans qu'aucune rupture n'ait été constatée. Les attaches plates coulisent dans les rails, les attaches filaires plastifient sans dégrader le mortier ou les tasseaux.

7.10.4. Conclusion sur les essais à grande échelle

Tous ces résultats montrent que les maquettes ont passé l'ensemble du protocole d'essais et permettent de valider le domaine d'emploi présenté au §2.

8. Environnement

8.1. Contexte

L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est une méthode d'évaluation normalisée (ISO 14040 [51] et 14044 [52]) qui permet de réaliser un bilan environnemental multicritère et multi-étape d'un produit, service ou procédé sur l'ensemble de son cycle de vie. Elle quantifie les contributions aux impacts environnementaux à chaque étape, de l'extraction des matières premières à la fin de vie, en passant par la fabrication, l'utilisation et le transport. L'ACV permet ainsi, par exemple, de comparer les impacts environnementaux de différents systèmes ayant la même fonction et de dégager des pistes d'écoconception.

Les Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) sont fondées sur cette méthode de l'ACV. Elles fournissent des informations détaillées sur les impacts environnementaux et sanitaires d'un produit de construction tout au long de son cycle de vie, de l'extraction des matières premières à la fin de vie du produit. La norme NF EN 15804+A2 [53] et son complément national NF EN 15804+A2/CN [54] sont les normes de référence pour la réalisation des FDES. Ces normes assurent que toutes les Déclarations Environnementales des Produits (DEP) sont obtenues, vérifiées et présentées de manière harmonisée. La version actuelle, NF EN 15804+A2 [53], introduit des modifications importantes, notamment l'obligation de déclarer les modules de fin de vie et les bénéfices au-delà du système (module D). Elle inclut également de nouveaux indicateurs et des informations sur le carbone biogénique contenu dans les produits.

La Réglementation Environnementale 2020 (RE2020) est la réglementation française qui régit la construction neuve. Elle remplace la Réglementation Thermique 2012 (RT2012) et vise à réduire les émissions de carbone et à améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. La RE2020 se concentre sur trois objectifs principaux : la sobriété énergétique, la décarbonation de l'énergie et le confort en cas de fortes chaleurs via le suivi de plusieurs indicateurs, dont un basé sur l'ACV et les FDES.

L'IC construction, ou Indicateur Carbone Construction, est un des indicateurs clés de la RE2020. Il mesure les émissions de gaz à effet de serre liées à la phase de construction d'un bâtiment. Le calcul de l'IC construction prend en compte l'ensemble des émissions générées par les matériaux de construction, leur transport, la mise en œuvre sur le chantier, ainsi que les déchets produits. Les FDES de la base INIES sont alors associés aux métrés du projet de bâtiment afin de réaliser l'ACV de celui-ci. Des seuils de kg CO₂eq par m² sont alors défini par la RE2020, qui ne doivent pas être dépassés.

8.2. Description des systèmes de mur double sur ossature bois

Le volet environnemental étant maintenant un aspect essentiel à étudier lors de la réalisation de bâtiments neufs, le projet WOODSTONE se propose d'étudier l'impact environnemental des systèmes constructifs identifiés. Les FDES (de préférence collectives) publiées sur INIES [55] et donc vérifiées par tierce partie sont préférées. Pour certains éléments non disponibles sur la base INIES, le logiciel Ecoinvent [56] et la base de données Ecoinvent sont utilisés.

Le mur double brique/ossature bois évalué correspond à une façade de 2,4x2,4m comprenant une ouverture de 1,2x1,1m. La surface réelle de la paroi considérée est de 4,4m².

Dans le cadre du projet, quatre variantes de murs doubles ont été étudiées :

- Mur double briques perforées (mortier en joints épais de 10 mm) / ossature en bois, système d'attaches filaires ;
- Mur double briques perforées (mortier en joints épais de 10 mm) / ossature en bois, système d'attaches plates ;
- Mur double briques pleines (mortier en joints semi-épais de 5 mm) / ossature en bois, système d'attaches filaires ;
- Mur double briques pleines (mortier en joints semi-épais de 5 mm) / ossature en bois, système d'attaches plates.

La présente évaluation environnementale porte uniquement sur les deux configurations de murs doubles suivantes :

- Mur double briques perforées ou pleines / bois, système d'attaches filaires ;
- Mur double briques perforées ou pleines / bois, système d'attaches plates.

Ce choix s'explique car les données environnementales des briques perforées ou pleines sont suffisamment proches pour avoir été couvertes par une seule FDES.

Le tableau ci-dessous décrit la composition des murs doubles évalués dans le cadre du projet.

Tableau 42 – Description des deux configurations de murs doubles brique / ossature en bois évaluées

Élément		Surface	Masse
Composants communs aux deux configurations			
MOB	Ossature (montants et traverses)	4,4 m²	76,2 kg
	OSB de type 3 (12 mm épaisseur)		32,3 kg
Autres éléments en bois	Tasseaux (pour fixation des jambages)	-	3,5 kg
Mur brique	Briques (pleine ou perforées)	4,4 m²	-
Éléments en acier	Cornière	-	18 kg
	Bavettes supérieure et inférieure		
	Jambages		
Composants spécifiques : système d'attaches			
Configuration 1 : Attaches filaires	Attaches filaires	-	0,5 kg
	Tasseaux (support des attaches)	-	2,2 kg
Configuration 2 : Attaches plates	Attaches plates	-	0,9 kg
	Rail (support des attaches)	-	4,8 kg

8.3. Source des données environnementales

8.3.1. Mur à Ossature en Bois (MOB)

Les données environnementales proviennent de la FDES collective publiée par le CODIFAB « mur ossature bois avec montant d'une largeur de 145 mm non isolé, fabriqué en France » et disponible sur la base INIES. Cette FDES a été réalisée conformément à la norme NF EN 15804+A2 [53] et au complément national français NF EN 15804+A2/CN [54].

Les performances environnementales sont déclarées pour un flux de référence de 1 m² et l'unité fonctionnelle suivante : « Assurer la fonction de mur porteur sur 1 m² de paroi pendant la durée de vie de référence (100 ans) ».

Le tableau ci-dessous décrit les hypothèses considérées pour caractériser le MOB de référence.

Tableau 43 – Caractéristiques du MOB de référence considéré dans la FDES collective du CODIFAB

Module du cycle de vie ¹	Description
A1A3 - Production	<ul style="list-style-type: none"> Ossature : mix de résineux, masse volumique de 458 kg/m³ Contreventement : OSB3, 12 mm d'épaisseur Avec pare-pluie, quincailleries et ferrures
A4 – Transport du produit jusqu'au site d'installation	Distance de transport : 399 km
A5 – Installation du produit sur chantier	<ul style="list-style-type: none"> Consommation de diesel et d'électricité (levage et installation du MOB) Consommation de quincailleries et ferrures supplémentaires
C – Fin de vie	<p>Scenario de fin de vie des produits bois (Projet GDBat [57])</p> <ul style="list-style-type: none"> 43,2% : recyclage en panneaux de particules 41,6% : Valorisation énergétique en chaudière et unité de cogénération 7,5% : Incinération en cimenterie 7,7% : Enfouissement en installation de stockage des déchets non dangereux (ISDND)
D – Bénéfices et charges au de la des frontières du système	<p>Principaux impacts évités considérés dans le scenario de fin de vie des produits bois (Projet GDBat [57])</p> <ul style="list-style-type: none"> Recyclage en panneaux de particule : impacts évités liés à la substitution de bois vierge par les déchets bois ; Production de chaleur en installation de valorisation énergétique (chaudière et unité de cogénération) : impacts évités liés à la substitution de gaz naturel par les déchets bois ; Production d'électricité en installation de valorisation énergétique (unité de cogénération) : impacts évités liés à la substitution d'électricité issue du réseau français par les déchets bois.

L'impact de l'ossature en bois a spécifiquement été recalculé afin de considérer la masse volumique des montants utilisés dans le projet, soit une masse volumique de 500kg/m³.

¹ Les modules du cycle de vie sont décrits en A3

8.3.2. Tasseaux de bois

Du bois sec raboté a été considéré pour représenter les tasseaux. Les impacts environnementaux liés à la fabrication de ces tasseaux ont été évalués à partir de données issues de la base Ecoinvent v3.10.

Le module de base utilisé est “Sawnwood, board, softwood, dried (u=20%), planed {Europe without Switzerland}”. Ce module a été adapté à une production française en remplaçant la production d’électricité issue du mix européen par de l’électricité produite en France (remplacement du module « Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland}| market group for electricity » par « Electricity, medium voltage {FR}| market group for electricity »).

Ce module est exprimé en mètre cube de bois. La masse volumique considérée est de 484 kg/m³ à 20% d’humidité sur base sèche.

Les données environnementales ont été calculées pour 1 kg de bois selon la norme NF EN 15804+A2 [53] et le complément national français NF EN 15804+A2/CN [54].

En complément de la fabrication des tasseaux, les hypothèses décrites ci-dessous ont été prises en compte pour modéliser leurs autres étapes du cycle de vie.

Tableau 44 – Hypothèses considérées concernant les modules A4 à D des tasseaux

Module du cycle de vie ¹	Description
A4 – Transport du produit jusqu’au site d’installation	Distance de transport : 399 km
A5 – Installation du produit sur chantier	-
C – Fin de vie	Scénario de fin de vie des produits bois (Projet GDBat [57]) : <ul style="list-style-type: none"> • 43,2% : recyclage en panneaux de particules • 41,6% : Valorisation énergétique en chaudière et unité de cogénération • 7,5% : Incinération en cimenterie • 7,7% : Enfouissement en installation de stockage des déchets non dangereux (ISDND)
D – Bénéfices et charges au-delà des frontières du système	Principaux impacts évités considérés dans le scénario de fin de vie des produits bois (Projet GDBat [57]) : <ul style="list-style-type: none"> • Recyclage en panneaux de particule : impacts évités liés à la substitution de bois vierge par les déchets bois ; • Production de chaleur en installation de valorisation énergétique (chaudière et unité de cogénération) : impacts évités liés à la substitution de gaz naturel par les déchets bois ; • Production d’électricité en installation de valorisation énergétique (unité de cogénération) : impacts évités liés à la substitution d’électricité issue du réseau français par les déchets bois.

Tableau 45 – Modélisation des flux considérés pour les modules A4 à D des tasseaux

Module du cycle de vie ¹	Description
A4 – Transport du produit jusqu’au site d’installation	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6
C – Fin de vie	Scenario de fin de vie des produits bois (Projet GDBat [57])
D – Bénéfices et charges au-delà des frontières du système	Scenario de fin de vie des produits bois (Projet GDBat [57])

8.3.3. Mur en briques

Les données environnementales proviennent de la FDES collective publiée par le CTMNC « Brique apparente » et disponible sur la base INIES. Cette FDES a été réalisée conformément à la norme NF EN 15804+A1 [53] et au complément national français NF EN 15804+A1/CN [54].

Note : La RE2020 accepte bien des données environnementales issues des deux versions de la norme NF EN 15804. Nous avons donc pu utiliser des données NF EN 15804+A1 et NF EN 15804+A2. Ce choix est justifié par l’absence de données A2 plus pertinentes actuellement disponibles et par le fait que les principales évolutions entre les amendements A1 et A2 concernent les produits biosourcés, dont on utilise bien des données A2.

Les performances environnementales déclarées dans la FDES « Brique apparente » correspondent à un flux de référence de 1 m² et l’unité fonctionnelle suivante : « Assurer la fonction de mur de parement sur un m² sur une durée de vie de référence de 100 ans ».

Le tableau ci-dessous décrit les hypothèses considérées pour caractériser le mur brique de référence.

Tableau 46 - Caractéristiques du mur en briques de référence considéré dans la FDES collective du CTMNC

Module du cycle de vie ¹	Description
A1A3 - Production	<ul style="list-style-type: none"> Briques pleines ou perforées
A4 – Transport du produit jusqu’au site d’installation	Distance de transport : 122 km
A5 – Installation du produit sur chantier	<ul style="list-style-type: none"> Mortier traditionnel/mortier colle : 36,5 kg sec / m² Attaches métalliques : 0,1 kg / m² Consommation d’eau Taux de chute à l’installation : 2%
C – Fin de vie	Scenario de fin de vie : <ul style="list-style-type: none"> 92,6% : recyclage 7,4% : mise en décharge
D – Bénéfices et charges au de la des frontières du système	Impacts évités considérés dans le scenario de fin de vie : <ul style="list-style-type: none"> Recyclage des produits : impacts évités liés à la substitution de granulats vierges par les déchets de terre cuite

8.3.4. Éléments en acier et systèmes d'attaches filaires/plates

Faute de données disponibles et directement issues de la base INIES, les impacts environnementaux de fabrication des éléments en acier ont été évalués à partir de données issues de la base Ecoinvent v3.10.

Les modules utilisés sont décrits dans le tableau ci-dessous.

Tableau 47 – Modules Ecoinvent utilisés pour évaluer les impacts environnementaux liés à la production des éléments en acier

Élément	Module issu de la base de données Ecoinvent v3.10
Acier (matière première)	Steel, low-alloyed {GLO} market for steel, low-alloyed
Mise en forme de l'acier	Deep drawing, steel, 10000 kN press, automode {FR} deep drawing, steel, 10000 kN press, automode
Zingage	Zinc coat, pieces {RER} zinc coating, pieces

Les données environnementales ont été calculées pour 1 kg d'acier galvanisé selon la norme NF EN 15804+A1 [53] et au complément national français NF EN 15804+A1/CN [54].

En complément de la fabrication des éléments en acier, les hypothèses décrites ci-dessous ont été prises en compte pour modéliser les autres étapes du cycle de vie de ces produits.

Tableau 48 – Hypothèses considérées concernant les modules A4 à D des éléments en acier

Module du cycle de vie ¹	Description
A4 – Transport du produit jusqu'au site d'installation	Distance de transport : 600 km
A5 – Installation du produit sur chantier	-
C – Fin de vie	Séparation des éléments en acier des autres déchets. Scénario de fin de vie : <ul style="list-style-type: none"> • 99% : recyclage • 1% : mise en décharge
D – Bénéfices et charges au-delà des frontières du système	Impacts évités considérés dans le scénario de fin de vie : <ul style="list-style-type: none"> • Recyclage de l'acier : impacts évités liés à la substitution d'acier vierge par les déchets d'acier ;

Tableau 49 – Modélisation des flux considérés pour les modules A4 à D des éléments en acier

Module du cycle de vie ¹	Description
A4 – Transport du produit jusqu’au site d’installation	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6
C – Fin de vie	<ul style="list-style-type: none"> Recyclage : Steel, low-alloyed {Europe without Switzerland and Austria} steel production, electric, low-alloyed Mise en décharge : Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, inert material landfill
D – Bénéfices et charges au-delà des frontières du système	Steel, low-alloyed {RER} steel production, converter, low-alloyed

8.4. Résultats

Les indicateurs environnementaux changement climatique total, changement climatique liés aux combustibles fossiles, et changement climatique biogénique sont étudiés.

L’indicateur changement climatique total regroupe les différentes composantes du changement climatique, dont les deux principales sont :

- Le changement climatique liés aux ressources fossiles : cet indicateur prend en compte les flux de carbone liés aux ressources fossiles ;
- Le changement climatique d’origine biogénique : cet indicateur prend en compte les flux de carbone (séquestrations et émissions) issus de la biomasse.

Ces indicateurs sont exprimés en kg eq CO₂.

8.4.1. Présentation des résultats à l’échelle des murs doubles WOODSTONE (4,4 m² de paroi avec ouverture)

L’ensemble des résultats sont détaillés en A4.

8.4.1.1. Impacts du cycle de vie total

Les figures ci-dessous présentent les impacts de chaque configuration de mur sur le changement climatique total et ses composantes.

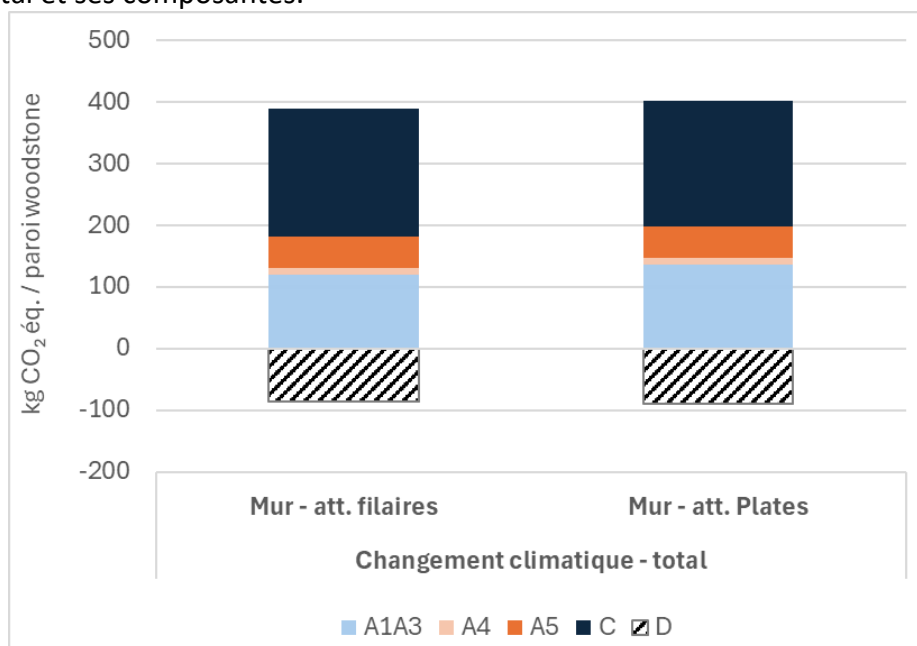


Figure 118 – Impact du cycle de vie des deux configurations sur l'indicateur changement climatique total (pour 4,4 m² de paroi avec ouverture)

L'impact environnemental des deux configurations de murs doubles brique/ossature en bois est similaire. Le mur avec attaches filaires a un impact AC de 389 kg eq CO₂/paroi, tandis que celui avec attaches plates a un impact de 403 kg eq CO₂/paroi, soit environ 4 % de plus. Cette différence s'explique en particulier par la quantité d'acier utilisée, les attaches plates nécessitant des rails en acier comme support, contrairement aux systèmes avec attaches filaire.

Les valeurs des modules D sont également proches : -86 kg eq CO₂/paroi pour les attaches filaires et -90 kg eq CO₂/paroi pour les attaches plates.

Les étapes du cycle de vie les plus impactantes sont la fabrication des composants (modules A1 à A3) et la fin de vie.

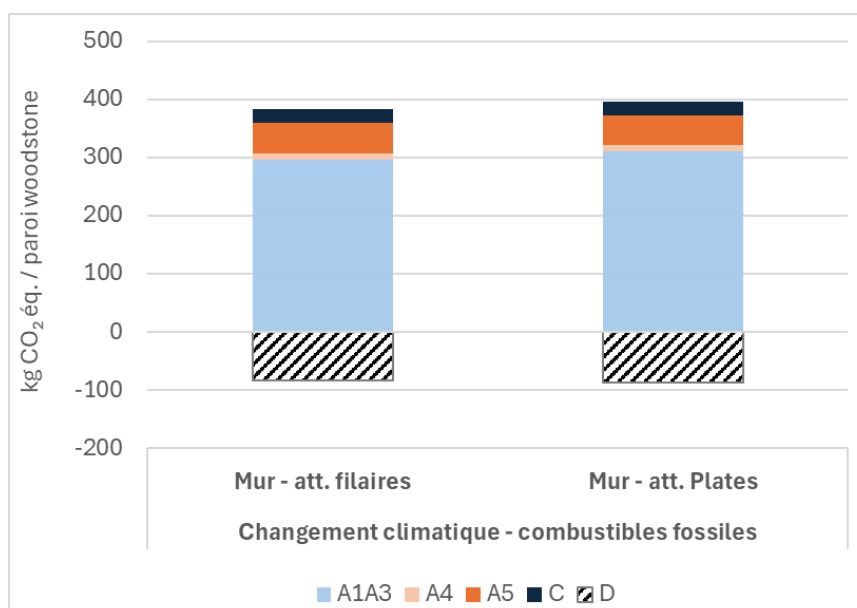


Figure 119 - Impact du cycle de vie des deux configurations sur l'indicateur changement climatique fossile (pour 4,4 m² de paroi avec ouverture)

La figure ci-dessus se concentre sur les flux de carbone fossile. Les principales sources d'émissions proviennent des modules A1A3 (78% de l'impact AC).

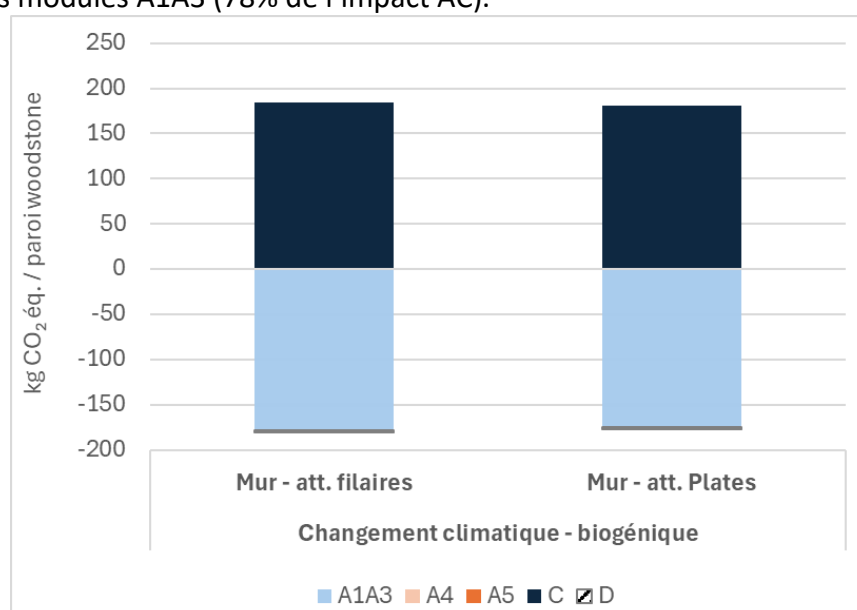


Figure 120 - Impact du cycle de vie des deux configurations sur l'indicateur changement climatique biogénique (pour 4,4 m² de paroi avec ouverture)

La figure ci-dessus se concentre sur les flux de carbone biogénique. Le flux négatif associé au module A1-A3 correspond à la séquestration de carbone dans le bois lors de sa croissance en forêt. Conformément à la norme NF EN 15804+A2, la totalité du carbone séquestré doit être réémis au cours du cycle de vie des produits biosourcés. Dans le cas du mur à ossature en bois, la majeure partie du carbone séquestré reste stocké dans le produit pendant toute sa durée de vie, soit 100 ans. En fin de vie, le carbone est majoritairement réémis dans l'atmosphère sous forme de CO₂ et minoritairement sous forme de méthane (CH₄).

8.4.1.2. Impacts des modules A1-A3

La figure ci-dessous détaille la source des impacts pour les modules A1-A3.

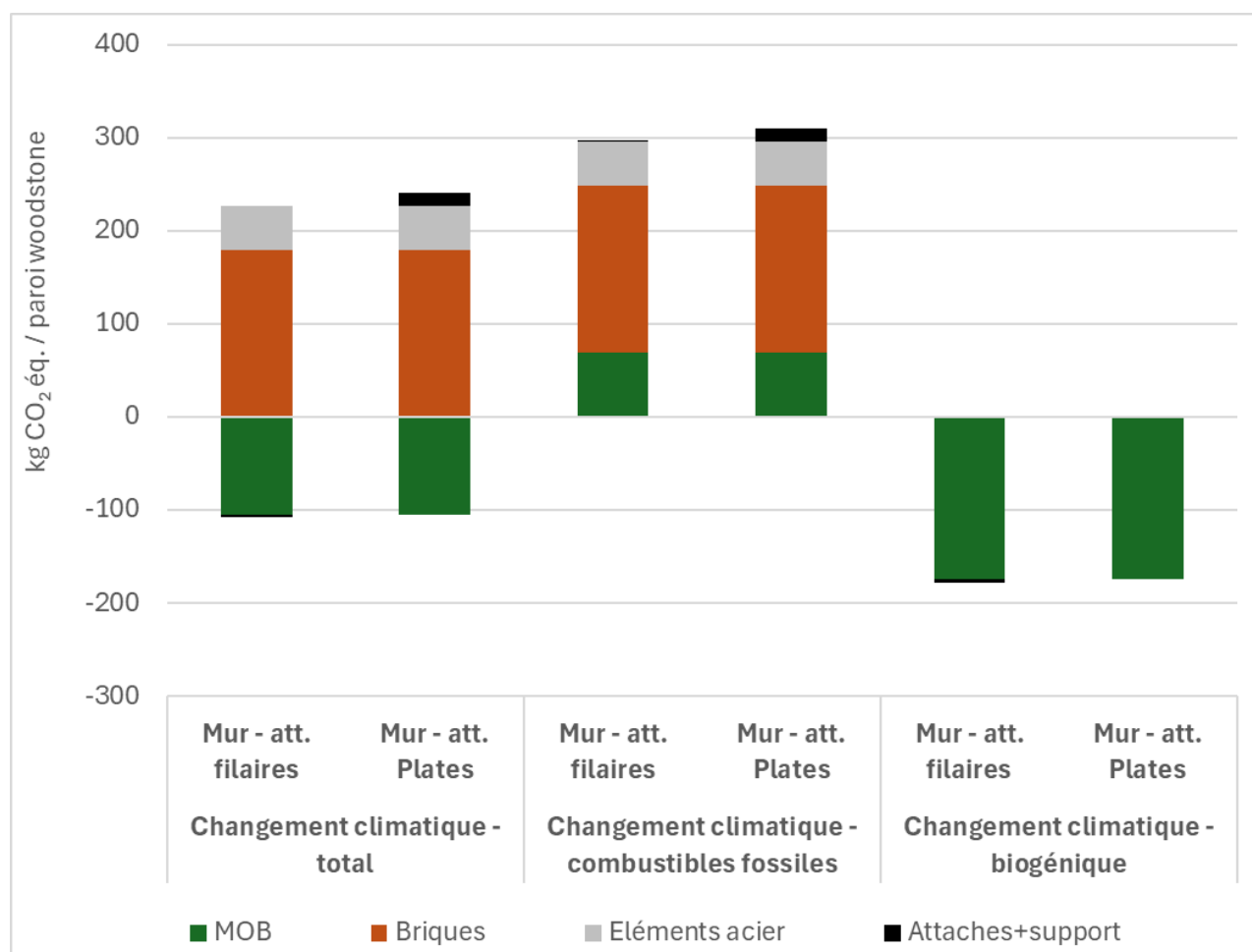


Figure 121 - Impact des modules A1A3 pour les deux configurations sur les trois indicateurs de changement climatique (pour 4,4 m² de paroi avec ouverture)

Concernant le MOB, le total des impacts fossiles et biogéniques pour les modules A1A3 est largement négatif car la séquestration carbone (biogénique) est supérieure aux émissions de carbone (fossile).

Les impacts fossiles proviennent pour partie de :

- La mise à disposition des panneaux OSB (A1A2) (33%) ;
- La mise à disposition des ferrures et quincailleries (A1A2) (29%) ;
- La mise à disposition du bois d'ossature (A1A2) (13%) ;
- La mise à disposition des emballages du MOB (film PE) (A3) (12%).

Les briques ne contenant pas de matière biosourcée, elles n'ont aucun impact sur l'indicateur changement climatique d'origine biogénique. Les impacts fossiles proviennent essentiellement des émissions de CO₂ ayant lieu lors de la cuisson des briques : 75% de la combustion du gaz naturel pour apporter l'énergie thermique nécessaire à la cuisson et 25% des émissions de process qui correspondent pour l'essentiel à la décarbonatation des carbonates de calcium et de magnésium du mélange argileux pendant la cuisson (décomposition en oxyde solide et en CO₂).

Concernant l'ensemble des éléments en acier, la principale source d'impacts est liée à la production de l'acier, notamment la consommation d'énergie fossiles visant à faire fondre le minerai de fer dans les aciéries.

Les impacts des groupements « attaches + support » sont opposés : dans le système avec attaches filaires, l'impact sur le changement climatique total est négatif car la séquestration carbone associée aux tasseaux de bois (utilisés comme support des attaches filaires) est supérieur à l'impact fossile des attaches en acier. Le système basé sur l'utilisation d'attaches plates fixées sur un rail acier engendre uniquement des impacts fossiles liés à la consommation d'acier pour les attaches et le rail.

8.4.1.3. Impacts des modules A5

La figure ci-dessous détaille la source des impacts pour les modules A5.

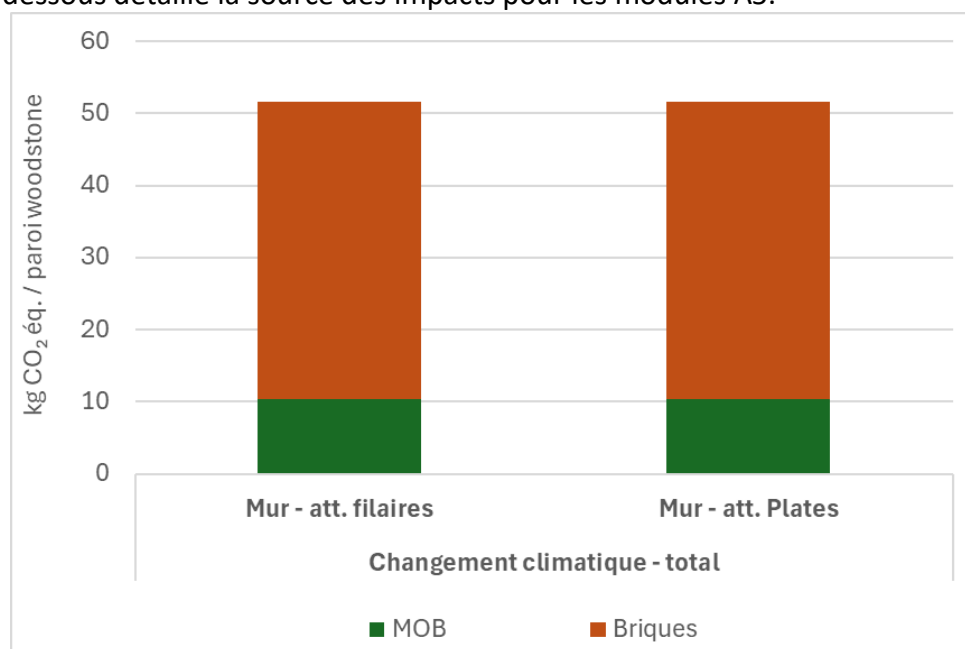


Figure 122 - Impact du module A5 pour les deux configurations sur l'indicateur de changement climatique total (pour 4,4 m² de paroi avec ouverture)

Pour le module A5, seuls les impacts sur le changement climatique total sont présentés car il n'y a aucun flux de carbone biogénique lors de cette étape. Les impacts sur le changement climatique total sont égaux aux impacts sur le changement climatique fossile.

Les impacts liés à l'installation du mur en brique proviennent essentiellement de la fabrication du mortier nécessaire au montage.

Concernant le MOB, les impacts sont liés à hauteur de 34% à la fabrication des éléments de quincaillerie ajoutés directement sur le chantier lors de l'installation du MOB ; et à 32% à la consommation de diesel par les matériels de levage.

8.4.1.4. Impacts des modules C

La figure ci-dessous détaille la source des impacts pour les modules C.

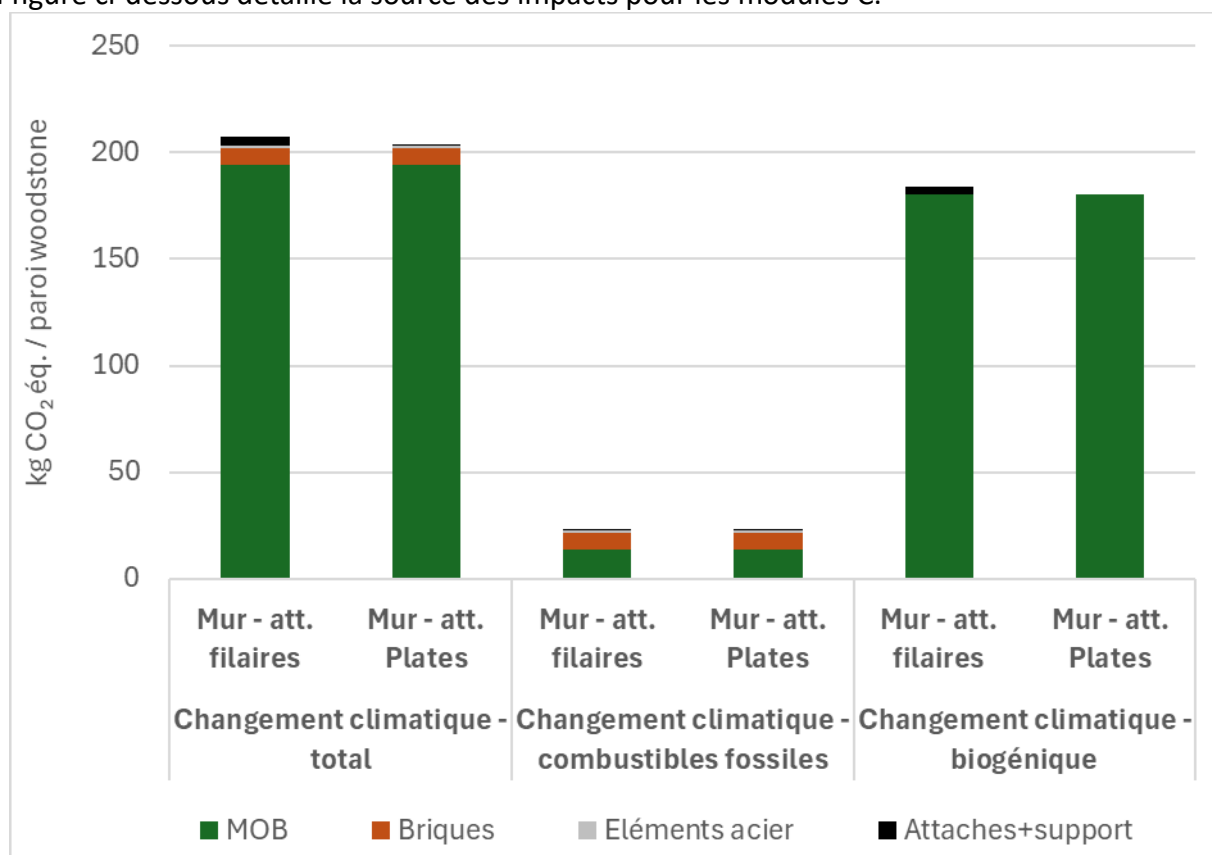


Figure 123 - Impact du module C pour les deux configurations sur les trois indicateurs de changement climatique (pour 4,4 m² de paroi avec ouverture)

L'étape de fin de vie est majoritairement impactée par la réémission du carbone biogénique contenu dans le MOB. La réémission du contenu carbone des tasseaux de bois utilisés comme support des attaches filaires est également visible.

Ces déchets de bois sont en majeure partie valorisés énergétiquement ou recyclés. Dans le premier cas de figure, la combustion de ces déchets entraîne la réémission réelle de leur contenu carbone sous forme de CO₂. Dans le second, la matière n'est pas détruite et son contenu carbone n'est pas réellement réémis dans l'atmosphère. Malgré tout, une réémission fictive est bien prise en compte pour éviter la double comptabilisation de la séquestration carbone dans le cycle de vie suivant (cycle de vie des panneaux de particules dans le présent cas de figure).

8.4.1.5. Impacts des modules D

La figure ci-dessous détaille la source des impacts pour les modules D.

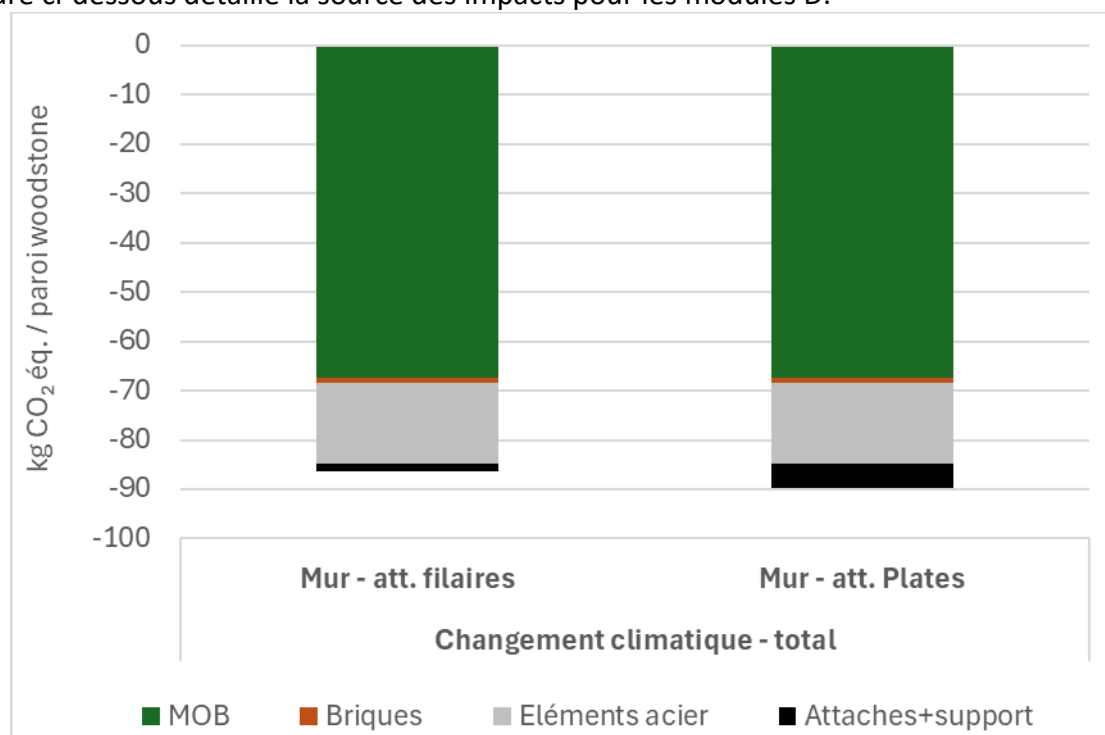


Figure 124 - Impact du module D pour les deux configurations sur l'indicateur de changement climatique total (pour 4,4 m² de paroi avec ouverture)

Pour le module D, seuls les impacts sur le changement climatique total sont présentés car les flux de carbone biogénique sont nuls lors de cette étape. Les impacts sur le changement climatique total sont égaux aux impacts sur le changement climatique fossile.

Le module D est principalement lié à la valorisation des déchets bois et plus précisément à leur valorisation en vue de produire de l'énergie thermique. La combustion de déchets bois permet en effet de se substituer à la combustion de gaz naturel, beaucoup plus impactante sur l'indicateur changement climatique.

Concernant les éléments en acier, les attaches et le support utilisé (rail acier), le recyclage de ces éléments permet d'éviter la production d'acier vierge, qui est un processus fortement impactant sur le changement climatique.

8.4.2. Présentation des résultats pour 1m² de murs doubles WOODSTONE (sans ouverture)

Pour permettre une comparaison grossière avec les indicateurs environnementaux d'autres solutions, les résultats présentés ci-dessus ont été rapportés à 1m² de mur double briques/ossature en bois sans ouverture. Cela entraîne une modification de la composition du mur double car du fait qu'il n'y ait plus d'ouverture, certains éléments en acier deviennent inutiles.

Conformément à ce que précise la norme NF EN 15804+A2, la comparaison des données environnementales doit se faire au niveau de l'ouvrage plutôt qu'à l'échelle des produits individuels. En effet, les produits de construction sont des semi-produits dont les performances

environnementales et techniques ne se manifestent pleinement qu’au sein de l’ouvrage final. Comparer des produits uniquement sur la base de leurs FDES peut être trompeur si l’on ne prend pas en compte leur fonction dans l’ouvrage, leur durée de vie, et les performances spécifiques attendues. Cette approche permet de s’assurer que les comparaisons sont faites sur des bases équitables et pertinentes, en tenant compte des caractéristiques techniques, esthétiques et économiques des produits dans leur contexte d’utilisation réel.

Le tableau suivant présente la composition pour 1m² de mur double.

Tableau 50 – Description des deux configurations de murs doubles brique / ossature en bois évaluées pour 1 m² de paroi

Élément		Surface	Masse
Composants communs aux deux configurations			
MOB	Ossature (montants et traverses)	1 m ²	12,1 kg
	OSB de type 3 (12 mm épaisseur)		7,3 kg
Mur brique	Briques (pleine ou perforées)	1 m ²	-
Composants spécifiques : système d’attaches			
Configuration 1 : Attaches filaires	Attaches filaires	-	0,1 kg
	Tasseaux (support des attaches)	-	0,6 kg
Configuration 2 : Attaches plates	Attaches plates	-	0,2 kg
	Rail (support des attaches)	-	1,2 kg

Les figures ci-dessous présentent les résultats. L’ensemble de ces valeurs sont détaillées en A5.

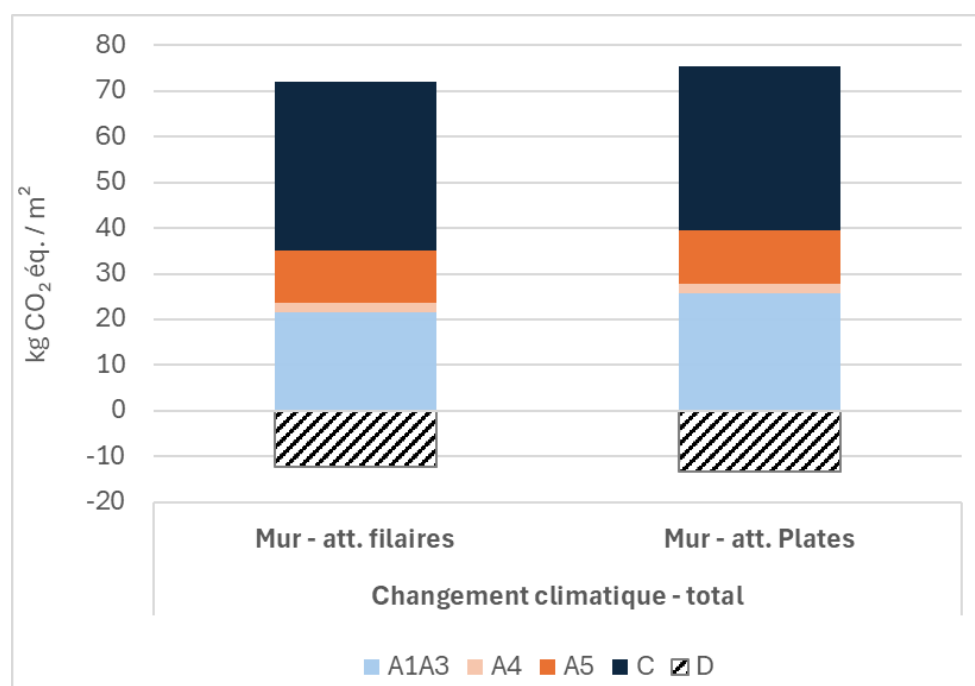


Figure 125 - Impact du cycle de vie des deux configurations sur l'indicateur changement climatique total (pour la 1 m² de paroi sans ouverture)

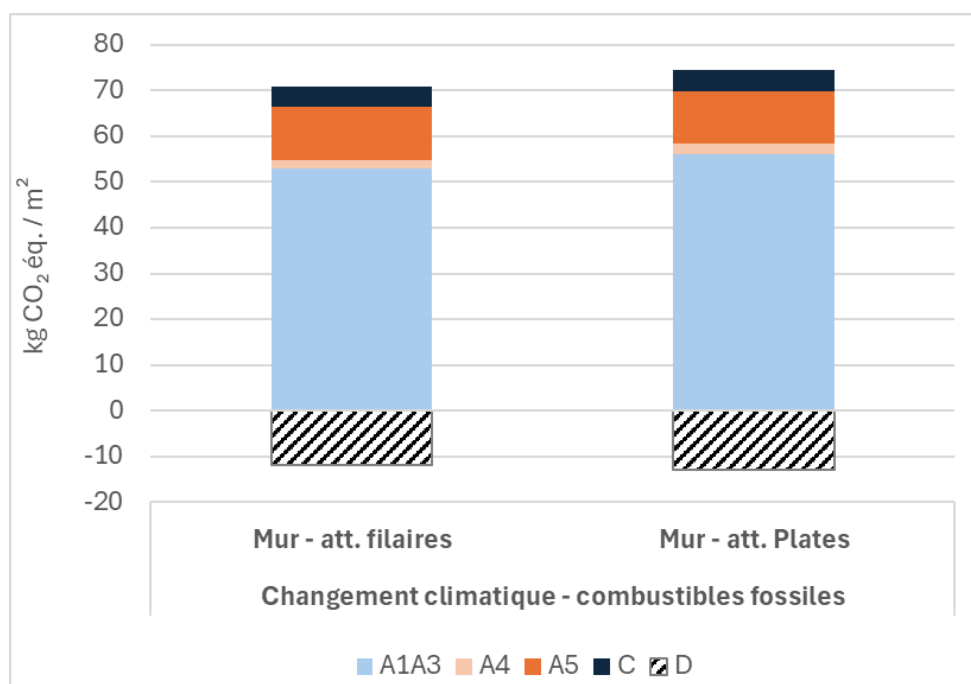


Figure 126 - Impact du cycle de vie des deux configurations sur l'indicateur changement climatique fossile (pour 1 m² de paroi sans ouverture)

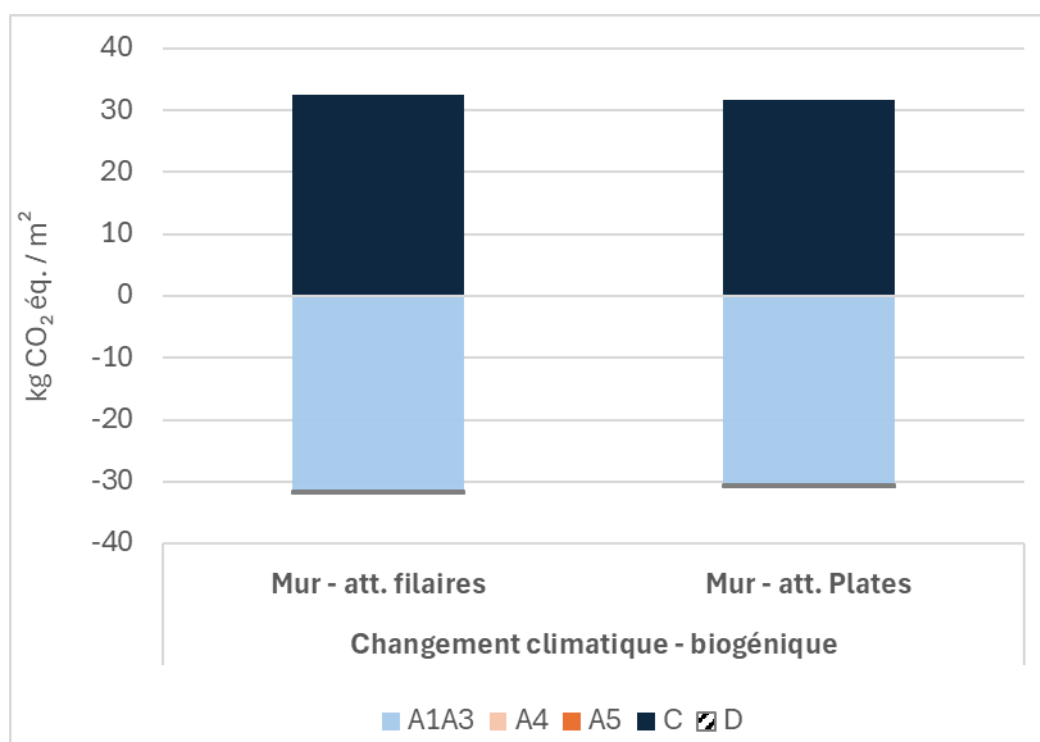


Figure 127 - Impact du cycle de vie des deux configurations sur l'indicateur changement climatique biogénique (pour 1 m² de paroi sans ouverture)

Sur les graphes ci-dessus, on retrouve l'écart non significatif entre les deux configurations.

9. Conclusions et perspectives

9.1. Conclusions

9.1.1. Essais à petite échelle

Après une analyse théorique de comparaison des composants disponibles sur le marché, deux références de briques, mortiers et attaches de liaison ont été choisies pour le projet. Les caractéristiques mécaniques des briques et mortiers ont été vérifiées par le biais d'essais normalisés.

Les essais de cisaillement réalisés ont permis de caractériser la liaison brique/mortier et évaluer la compatibilité entre les briques et mortiers considérés. Sur la base des résultats de ces essais, un mortier satisfaisant aux exigences d'adhérence a été choisi pour les essais à grande échelle.

Des essais de traction et de compression sur attaches ont été réalisés avec une charge de compression nulle pendant l'essai (mode opératoire conduisant à des performances conservatives), et permettent de valider le bon ancrage des attaches. Les résultats de ces essais permettent de calculer le nombre minimal d'attaches nécessaires pour assurer la stabilité sous sollicitation de vent.

En outre, les essais à petite échelle ont permis d'alimenter le jeu de données d'entrée concernant la liaison brique/mortier/attache du modèle numérique, qui a pu servir à la réalisation des études paramétriques.

9.1.2. Modélisation numérique

9.1.2.1. Modèle mis en place :

La modélisation numérique par éléments finis, développée sous Abaqus, a permis de représenter de manière réaliste le comportement mécanique des systèmes d'attaches dans la maçonnerie, soumis à différents types de sollicitations (traction et compression). Les différents composants du système — attache, mortier, brique — ont été modélisés avec des lois de comportement calibrées à partir d'essais expérimentaux, incluant également des interfaces cohésives pour simuler les liaisons mortier/brique et mortier/attaches. Les résultats montrent une bonne concordance entre les simulations et les essais, que ce soit pour les attaches plates ou filaires, avec ou sans rail. Le modèle a également intégré les effets des géométries complexes, des encoches (casse-goutte), et des hétérogénéités de matériaux. En particulier, l'utilisation de modèles cohésifs a permis de rendre compte des mécanismes de rupture observés en interface mortier-attache et mortier-brique. Ce modèle a permis de réaliser des analyses paramétriques visant à appréhender la sensibilité des systèmes d'attache à différents paramètres tels que : les caractéristiques du mortier, la présence d'un casse-goutte et l'influence du rail dans la résistance des attaches plates et de leurs excentrement.

9.1.2.2. Etude paramétrique

L'étude paramétrique a permis de mieux comprendre l'influence de différents paramètres géométriques et matériaux sur le comportement des attaches. La présence du casse-goutte diminue la résistance en compression d'environ 30 %, en raison d'un flambement localisé.

L'élément présentant la plus forte influence sur le comportement mécanique des attaches plates est le rail, notamment en traction. En effet, la ruine par détachement de l'attache du rail-support est le mode prédominant en traction. Par ailleurs, il a été montré que l'excentricité de l'attache dans le rail modifie la répartition des contraintes sans affecter significativement la résistance globale.

De plus, celui-ci a aussi une influence significative sur le comportement en compression, cependant les résistances obtenues restent largement supérieures à celles en traction.

Dans le cas de l'attache filaire, il a été constaté que la rupture se situe plutôt du côté de la liaison attache/mortier, rendant ce système plus résistant en traction mais aussi plus sensible aux performances du mortier utilisé.

9.1.3. Essais à grande échelle

Les essais à grande échelle ont permis de réaliser des maquettes en condition réelle, à l'échelle de la paroi. Les choix en termes d'attaches (type et densité) ainsi que les règles de conceptions pour les points singuliers de type encadrement de baie ont été testées et ont répondu favorablement aux essais réalisés.

Les attaches plates coulissent dans le rail pour les sollicitations verticales permettant une liberté de mouvement dans ce plan. Les attaches filaires se plient légèrement sans dégradation du mortier ou des tasseaux ni apparition de fissures. Les quatre configurations testées n'ont montré ni fissuration ni dégradation après les essais de vieillissement mécaniques (déformation différentielle et mise en parallélogramme).

Les essais d'étanchéité à l'eau ont montré la présence de quelques traces d'eau, peu nombreuses, le long de l'encadrement de baie jusqu'au tasseau ou rail. Les volumes recueillis sont négligeables. Aucune dégradation n'a été constatée lors des essais de résistance au vent ni sous charge au vent accrue (sécurité).

Enfin, les essais de déformations différentielle jusqu'à un déplacement de 30mm n'ont montré aucune rupture. Les attaches plates coulissent dans les rails, les attaches filaires se plastifient sans dégrader le mortier ou les tasseaux.

L'ensemble de ces résultats indique que les préconisations et conceptions détaillées dans le présent document peuvent être appliquées pour le domaine d'emploi défini au §2.

9.2. Perspectives

La présente étude apporte des éléments de preuve permettant de fiabiliser la technique de mur double maçonneré sur ossature en bois.

Ces livrables peuvent permettre l'élaboration d'un document pré-normatif qui pourra permettre un retour en technique courante sous la forme, par exemple :

- D'une intégration aux DTU 20.1 et 31.2
- De règles professionnelles

Cependant, avant de pouvoir proposer en technique courante ce système de mur double maçonneré, certains éléments qui n'ont pu être abordés dans le cadre de cette étude sont manquants.

Nous les avons listés ci-après.

9.2.1. Modélisation numérique

Plusieurs pistes d'approfondissement peuvent être envisagées pour compléter l'étude. Il serait notamment intéressant d'évaluer l'influence de l'épaisseur du lit de mortier, qui pourrait modifier les conditions de transfert de charges entre les matériaux et impacter la rigidité globale du système. Des modèles analytiques existent pour les attaches de types filaires, il serait alors pertinent de se servir du modèle E.F. pour proposer un modèle adapté au système d'attache avec rail. Ce modèle pourrait permettre de traduire les résistances et raideurs en traction et compression, avec une meilleure prise en compte des conditions aux limites propres au rail pour en déduire une longueur de flambement adaptée. Enfin, ce modèle permettrait de traduire le système d'attaches dans un modèle de mur complet en simplifiant les attaches au travers de ressorts dont les raideurs et résistances seraient déduites du modèle analytique.

Le modèle de mur complet permettrait alors d'évaluer plus précisément la répartition des efforts dans les différentes attaches, pour des chargements tels que ceux réalisés dans le cadre des essais à grande échelle.

9.2.2. Consoles et linteaux

Une perspective serait de réaliser des consoles et/ou linteaux fixés à la structure à ossature en bois pour reprendre des charges importantes ou réaliser des baies de grandes dimensions. Dans ce cas, il faudrait étudier leurs implantations et adapter la conception de l'ouvrage (joints de fractionnement, de dilatations...).

9.2.3. Encadrement de baie

Les encadrements de baie dans l'étude sont réalisés en métal. Une perspective d'évolution serait d'étudier la possibilité de réaliser les retours en tableau en maçonnerie en précisant les détails de liaisons avec l'ossature en bois pour assurer une tenue mécanique et une continuité de l'étanchéité à l'eau.

9.2.4. Extension à la pierre, la brique de terre crue

L'étude pourrait être étendue à d'autres types de murs doubles utilisant du bois et des matériaux géosourcés, notamment la pierre naturelle, ou la terre crue sous forme de pisé, ou les briques de terre crue.

9.2.5. Domaine d'emploi

Il pourrait être étudié une extension du domaine d'emploi de cette étude (voir §2).

9.2.5.1. Hauteur de bâtiment

Afin d'envisager une hauteur de bâtiment plus élevée que dans le cadre de cette étude, plusieurs points seraient à étudier parmi lesquels :

- La réalisation de console de supportage à chaque étage, de joints séparatifs en indiquant les conceptions et techniques de mises en œuvre
- La réponse aux questions de sécurité incendie en précisant comment appliquer l'IT249 sur cette technique, dès lors qu'il existe une exigence réglementaire relative à la propagation du feu par les façades, en fonction du type de bâtiment visé et de la hauteur du bâtiment

9.2.5.2. Sismique

L'étude actuelle se limite aux cas où la catégorie d'importance du bâtiment et / ou la zone de sismicité ne nécessitent pas d'obligation de dimensionnement de l'ouvrage au séisme (voir Tableau 6).

Une perspective d'étude se situe dans l'apport de preuves et de préconisations que la technique fonctionne lors d'une obligation de dimensionnement de l'ouvrage au séisme, avec d'éventuelles restrictions.

Bibliographie

- [1] AFNOR, *NF DTU 20.1 - Travaux de Bâtiment – Ouvrages en maçonnerie de petits éléments - Parois et murs*, 2008.
- [2] AFNOR, *NF DTU 31.2 - Travaux de bâtiment - Construction de maisons et bâtiments à ossature en bois*, 2019.
- [3] AFNOR, *NF DTU 20.1 - Travaux de Bâtiment – Ouvrages en maçonnerie de petits éléments - Parois et murs*, 2020.
- [4] Grenelle environnement, « Recommandations professionnelles 'Murs doubles avec isolation thermique par l'extérieur ». 2014.
- [5] AFNOR, *NF EN 771-1+A1 - Spécifications pour éléments de maçonnerie - Partie 1 : briques de terre cuite*, 2015.
- [6] CSTB, *DTA 16/23-795_V1 - Procédé de mur double TERCA en zone sismique à la demande de la société Wienerberger et la société Fixinov*, 2023.
- [7] CSTB, « ATEx de cas a n°2864-V2, sur le procédé de paroi extérieure de murs doubles en blocs BLOCSTAR sur structure bois à la demande de Techni-Process ». 2023 2020.
- [8] CSTB, « ATEx de cas b n° 2938_V1, sur « un procédé de paroi extérieure de murs doubles en briques sur des parois à ossature bois ». A la demande de Créatis ». 2023.
- [9] Conseil national de la recherche du Canada, *Code de la construction du Québec, Chapitre I – Bâtiment, et Code National du bâtiment du Canada*, 2015.
- [10] SCHL, *Guide Construction Ossature Bois, Chapitre 13 – Revêtement mural intermédiaire et revêtement extérieur de finition*, 2013.
- [11] FPIInnovations, « Fiche technique de bonnes pratiques Parement de maçonnerie fixé sur un bâtiment en ossature bois ». 2024.
- [12] The Brick Industry, « Wall Ties for Brick Masonry », *Technical Notes on Brick Construction*, 2003.
- [13] The Brick Industry, « Brick Veneer/Wood Stud Walls », *Technical Notes on Brick Construction*, 2012.
- [14] Buildwise, « Liaison d'un parement maçonné à une ossature en bois », 2017.
- [15] CSTB, *NF DTU 41.2 Revêtements extérieurs en bois*, 2015.
- [16] MSJC, *The Masonry Standards Joint Committee Code*, 2008.
- [17] US Standards, *TMS 402-08/ACI 530-08/ASCE 5-08, Building code requirements for masonry structures*, 2008.
- [18] O. Arslan, F. Messali, E. Smyrou, İ. E. Bal, et J. G. Rots, « Mechanical modelling of the axial behaviour of traditional masonry wall metal tie connections in cavity walls », *Construction and Building Materials*, vol. 310, p. 125205, déc. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125205.
- [19] O. Arslan, F. Messali, E. Smyrou, İ. E. Bal, et J. Rots, « Numerical modelling of cavity wall metal ties: 17th World Conference on Earthquake Engineering », sept. 2020.
- [20] J. Ortega, N. Mendes, et G. Vasconcelos, « Numerical Simulation of the Tension–Compression Behavior of Tie Connections in Brick Masonry Walls », *CivilEng*, vol. 3, n° 2, p. 441-455, mai 2022, doi: 10.3390/civileng3020026.
- [21] European Committee for Standardization, « Eurocode 1 - Actions sur les structures - Partie 1-4 : Actions générales - Actions du vent - Annexe nationale à la NF EN 1991-1-4 ». mars 2008.
- [22] Code de l'environnement, « Arrêté du 22 octobre 2010 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments de la classe dite « à risque normal » ». 2010.

- [23] AFNOR, « NF EN 1998-1 : Eurocode 8 – Calcul des structures pour leur résistance aux séismes – Partie 1 : Règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments. » septembre 2005.
- [24] A. Perret, *Instruction technique n° 249 Relative aux façades (Arrêté du 24 mai 2010)*, NOR : IOCE1014119A, 2010.
- [25] AFNOR, *NF EN 772-22 - Méthodes d'essai des éléments de maçonnerie - Partie 22 : détermination de la résistance au gel/dégel des éléments de maçonnerie en terre cuite*, 2018.
- [26] AFNOR, *NF EN 1996-2 : Eurocode 6 - Calcul des ouvrages en maçonnerie – Partie 2 : Conception, choix des matériaux et mise en œuvre des maçonneries*, 2006.
- [27] AFNOR, *NF EN 998-2 : Définitions et spécifications des mortiers pour maçonnerie – Partie 2 : Mortiers de montage d'éléments de maçonnerie*, 2016.
- [28] *NF EN 845-1+A1 - Spécifications pour composants accessoires de maçonnerie — Partie 1 : Attaches, brides de fixation, étriers de support et consoles*, 20, 2013.
- [29] FFTB et CTMNC, « Maçonneries et revêtements de murs et sols en terre cuite apparente ». 2010.
- [30] Abey Australia, « The Abey Brickie's Guide ». 2021.
- [31] Programme PACTE, « Détermination des hypothèses pour les simulations de transferts couplés température / humidité dans les parois de bâtiment », 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.proreno.fr/documents/determination-des-hypotheses-pour-les-simulations-de-transferts-couples-temperature-humidite-dans-les-parois-de-batiment>
- [32] AFNOR, *NF EN 772-19 - Méthodes d'essai des éléments de maçonnerie - Partie 19 : détermination de la dilatation à l'humidité des grands éléments de maçonnerie en terre cuite perforés horizontalement*, 2001.
- [33] AFNOR, *NF EN 1996-1-1 + A1 : Eurocode 6 — Calcul des ouvrages en maçonnerie — Partie 1-1 : Règles générales pour ouvrages en maçonnerie armée et non armée*, 2013.
- [34] AFNOR, *NF EN 336 - Bois de structure - Dimensions, écarts admissibles*, 2013.
- [35] AFNOR, *Eurocode 5 - Conception et calcul des structures en bois - Partie 1-1 : généralités - Règles communes et règles pour les bâtiments.*, 2005.
- [36] AFNOR, *NF EN 1015-11 - Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 11 : détermination de la résistance en flexion et en compression du mortier durci*, 2019.
- [37] AFNOR, *NF EN 1052-3 - Méthodes d'essai de la maçonnerie - Partie 3 : détermination de la résistance initiale au cisaillement*, 2003.
- [38] AFNOR, *NF EN 1052-3/A1 - Méthodes d'essai de la maçonnerie - Partie 3 : détermination de la résistance initiale au cisaillement*, 2007.
- [39] AFNOR, *NF EN 846-5 - Méthode d'essai des composants accessoires de maçonnerie – Partie 5 : détermination de la charge admissible à la traction et à la compression et des caractéristiques effort-déformation des attaches murales*, 2013.
- [40] CTMNC, « Rapport d'essai de compression sur briques HTR WF dans le cadre du projet WoodStone », 230548-1, 2024.
- [41] CTMNC, « Essais de caractérisation des mortiers PRB de montage et PRB MJ VIF », 2304404, 2024.
- [42] AFNOR, *NF EN 1990 - Eurocodes structuraux - Bases de calcul des structures*.
- [43] M. A. Dalle, « Étude multi-échelle du comportement mécanique et au feu des murs en maçonnerie montés aux joints minces », phdthesis, INSA de Rennes, 2022. Consulté le: 28 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-04420084>
- [44] AFNOR, *NF EN 12155 - Façades rideaux - Détermination de l'étanchéité à l'eau - Essai de laboratoire sous pression statique*, 2000.
- [45] AFNOR, *NF EN 12179 - Façades rideaux - Résistance à la pression du vent - Méthode d'essai*, 2000.

- [46] FCBA, « Rapport d'essai Attaches filaires-Briques creuses », Rapport 403-23-0541_A-1-v1, 2024.
- [47] FCBA, « Rapport d'essai Attaches filaires-Briques pleines », Rapport 403-23-0541_A-2-v1.
- [48] FCBA, « Rapport d'essai Attaches plates-Briques creuses », Rapport 403-23-0541_A-3-v1.
- [49] FCBA, « Rapport d'essai Attaches plates-Briques pleines », Rapport 403-23-0541_A-4-v1.
- [50] AFNOR, *NF EN 12154 - Façades rideaux - Étanchéité à l'eau - Exigences de performance et classification*, 2000.
- [51] AFNOR, *NF EN ISO 14040—Management environnemental—Analyse du cycle de vie—Principes et cadre*, 2006.
- [52] AFNOR, *NF EN ISO 14044—Management environnemental—Analyse du cycle de vie—Exigences et lignes directrices.*, 2006.
- [53] AFNOR, *NF EN 15804/A2 -Contribution des ouvrages de construction au développement durable—Déclarations environnementales sur les produits—Règles régissant les catégories de produits de construction*, 2018.
- [54] AFNOR, *NF EN 15804 A2/CN - Contributions des ouvrages de construction au développement durable—Déclarations environnementales sur les produits—Règles régissant les catégories de produits de construction—Complément national à la NF EN 15804 A2*, 2022.
- [55] INIES, *Base de données FDES*. [En ligne]. Disponible sur: <https://base-inies.fr/consultation/tableau-de-bord>
- [56] Ecoinvent, *Logiciel et base de données Ecoinvent*. [En ligne]. Disponible sur: <https://ecoinvent.org/>
- [57] FCBA, « Gestion des Déchets Bois du Bâtiment - GDBAT », 2022.

Annexes

A1. Benchmark des attaches et mortiers et de leurs principales propriétés

Le Tableau 51 présente une sélection des mortiers de montage de maçonneries en briques ainsi que leurs principales propriétés déclarées par les fabricants.

WOODSTONE – Murs doubles en briques apparentes sur support en bois

Tableau 51 - Propriétés déclarées par les fabricants des mortiers adaptés à la maçonnerie de terre cuite (non exhaustif)

	Réf. du mortier	Fabricant	Ciment	Chaux hydraulique	Chaux aérienne	Résistance à la compression à 28j (MPa)	Résistance à la flexion à 28j (MPa)	Résistance initiale au cisaillement (N/mm ²)	Absorption d'eau par capillarité (kg/(m ² .min ^{0.5}))	Adhérence à 28 j (N/mm ²)	Dosage en eau (L/kg)	Consommation (kg/m ² /mm d'épaisseur)	Masse volumique mortier frais	Masse volumique mortier durci (kg/m ³)	Granulométrie (mm)	Temps ouvert (min)	Durée Pratique d'Utilisation (h)
Joint épais mortier de ciment	Mur 8 DSM	Cantillana	Ciment Portland blanc			M 5							1750	1700	0/2		2
	Mur 12 DSM	Cantillana	Ciment Portland blanc			M 10											
	Mur 8/2	Cantillana	10< <45% ciment Portland	0< <35% HL et NHL		M 5	2			> 0,15		25kg de mortier sec donnent 15L de mortier gaché					
	151 Mortier universel	Parex Lanko (Sika)	350 kg/m ³ de sable (DOP) 2,5< <10% clinker de ciment portland (FDS)			14	4		< 0,5		0,14				0/4		2
	PRB Mortier de montage	PRB	10 < <25% clinker de ciment Portland dose en ciment : 350 kg/m ³ de sable sec			M 10	2 à 7	0,15 (tabulée)	<=0,5		0,12	sans joints verticaux 35/40kg/m ² de parpaings montés			0/4		2
	Baunit MM 100	Baunit	/pas de donnée/			>=10	3	0,15	<=0,4		0,14			1725	0/2		2
	Baunit MM 50	Baunit	/pas de donnée/			M5 >=5	2,5	0,15	<=0,4		0,14			1700	0/2		2
	Mortier universel	Cermix	/pas de donnée/			M20 C7	F2		<1	0,15	0,14	2			0/4		2
	Ultibat M20	Saint-Gobain	10< <25% clinker de ciment portland 350kg/m ³			M20 C7	F2		W1 <=0,4	>0,3 FP : B							

WOODSTONE – Murs doubles en briques apparentes sur support en bois

	Mortier renforcé 350	Weber saint gobain	10< <20% clinker de ciment portland						0,3	0,13	2			0/4		
	Multibat ecoplanet	Lafarge	5< <100% clinker de ciment portland (+ cendres volantes, 0< <35%)			12,5 (DOP) moy : 20										
Joint épais mortier bâtard	153 Mortier Bâtard	Parex Lanko	13% clinker de ciment portland		5%	6,5	2	< 0,5		0,14	1,9			0/4		
	Mortier pour travaux courants de maçonnerie	Weber saint gobain	23%	0,1< <1% (FDS)		C16	F3	W0 0,5		>0,3 FP :B	2					
	PRB Mortier Bâtard	PRB	2,5 < < 10% clinker de ciment portland	2,5< <10% NHL							20 à 25kg/m² de mur monté			3,5 mm		
	Le Maniable batidur	Calcia	7% (DOP) 0< <25% clinker de ciment portland (FDS)	19,3% (DOP) 0< <25% chaux hydraulique naturelle (FDS)				0,5								
	Mortier Bâtard	Parex Lanko (Sika)	17% clinker ciment Portland		8% ?	10	2	< 0,5		14%	1,9					
Joint semi-épais	562 Lankovifs	Parex Lanko (Sika)	25< <50% clinker de ciment portland	2,5< <10%		M 20	3	< 1		0,16	1 à 1,5 (joint de 10mm) 3 à 5 (pour joint de 3mm)					
	Mur 8 DBM	Cantillana	ciment Portland blanc			M 5										
	Mur 12 DBM	Cantillana	ciment Portland blanc			M 10										

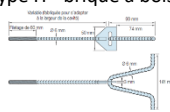
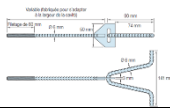




WOODSTONE – Murs doubles en briques apparentes sur support en bois

	webermix MC 391	Weber saint gobain	25< <50% ciment portland gris			M 15 22	>=5,5	>=0,3	0,20		0,16 à 0,2	280kg/1000briques	2060	1900		4 à 7	2
	webermix MC 392	Weber saint gobain	25< <50% ciment portland gris			M 15 22	>=5,5	>=0,3	0,21		0,16 à 0,2	280kg/1000briques	2060	1900		4 à 7	2
	PRB MJ VIF	PRB				M10	>3		<0,5		0,19 à 0,21	15 à 20 kg/m²		1700	2	15	2
	Mortier pour joints vifs	Cermix	<=40% clinker de ciment portland	<=2% ?	/pas de donnée/	M15			<=0,10	>0,3 (valeur tabulée)		pour joint de 3, 4mm, 15 à 20kg/m²		1700		15	1 à 3

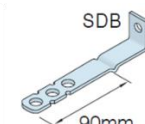
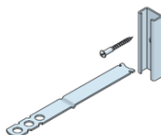
WOODSTONE – Murs doubles en briques apparentes sur support en bois

Le Tableau 52 présente une sélection de système d’attaches dédiées aux maçonneries sur ossature en bois, ainsi que leurs principales propriétés déclarées par les fabricants.

Tableau 52 - Propriétés déclarées par les fabricants d'attaches adaptées à la maçonnerie de terre cuite sur ossature bois (non exhaustif)

Nom du fabricant et Référence produit	Matière	Diamètre et Longueur attaches	Largeur de cavité (mm)	Compression DRd (N)	Traction ZRd (N)	Mouvement permis (mm)	Accroche brique	Accroche bois	Exigences vis à vis des briques, du mortier, ou du bois
Attaches en V									
Ancon Ancrage AMR type H - brique à bois 		(a)*	40-100	2500	2000	25	Extrémité noyée dans lit de mortier	A*	Briques : Résistance en compression 20 N/mm² Mortier : Résistance à la compression 15 N/mm² Bois : B**
			101-400	1200	2000				
Attaches filaires									
Plaka Crochet de maçonnerie, N°10 Crochet ossature bois 	1*	4 mm					Ondulation 40 à 80 mm de profondeur	Extrémité filetée 30 mm de profondeur	
	2**	De 160 à 400 mm							
	3***	4 mm 400 mm							
Plaka dBreak Crochet acoustique 	Inox 304 Et Composite caoutchouc- liège renforcé par des fibres de Kevlar	4 mm de diamètre 200 – 250 mm	> 45 mm				Extrémité coudé noyé dans lit de mortier	A adapter	
Ancon Teplo-L- TieTEPLO-L-5-longueur cavité. gamme Teplo a été testée manière indépendante détient le certificat British Board of réement (14/5160). 		165-265	100-200	660	920		Extrémité noyée dans lit de mortier sur 65 mm	C***	Mortier M2 Résistance en compression et traction de 2500 N
		290-365	225-300	900	1130				
Attaches plates									
Ancon STF50		(a)*	50	483	657	< 24	Extrémité noyée dans lit de mortier		
Ancon STF75			75	510	730				
Ancon STF100			100	540	660				

WOODSTONE – Murs doubles en briques apparentes sur support en bois

 <p>Ancon TFMT SD25 SDB 90mm</p>		(a)*	50-150	1300	960	> 24	Extrémité noyée dans lit de mortier	Vis à travers les trous de 5,3 mm dans le rail	
	Nuance acier 1.4301/1.4401	100- 150mm	59- 109mm	1650	1250	< 65 pour rail court	Extrémité noyée dans lit de mortier	Fixation grâce à un système de rail (court – 90 mm , ou toute longueur)	Type M2

1* fil en acier galvanisé à chaud (50-70 gr/m²)

2** fil en acier inoxydable A2 (MX3)

3*** fil en acier inoxydable A4 (MX4)

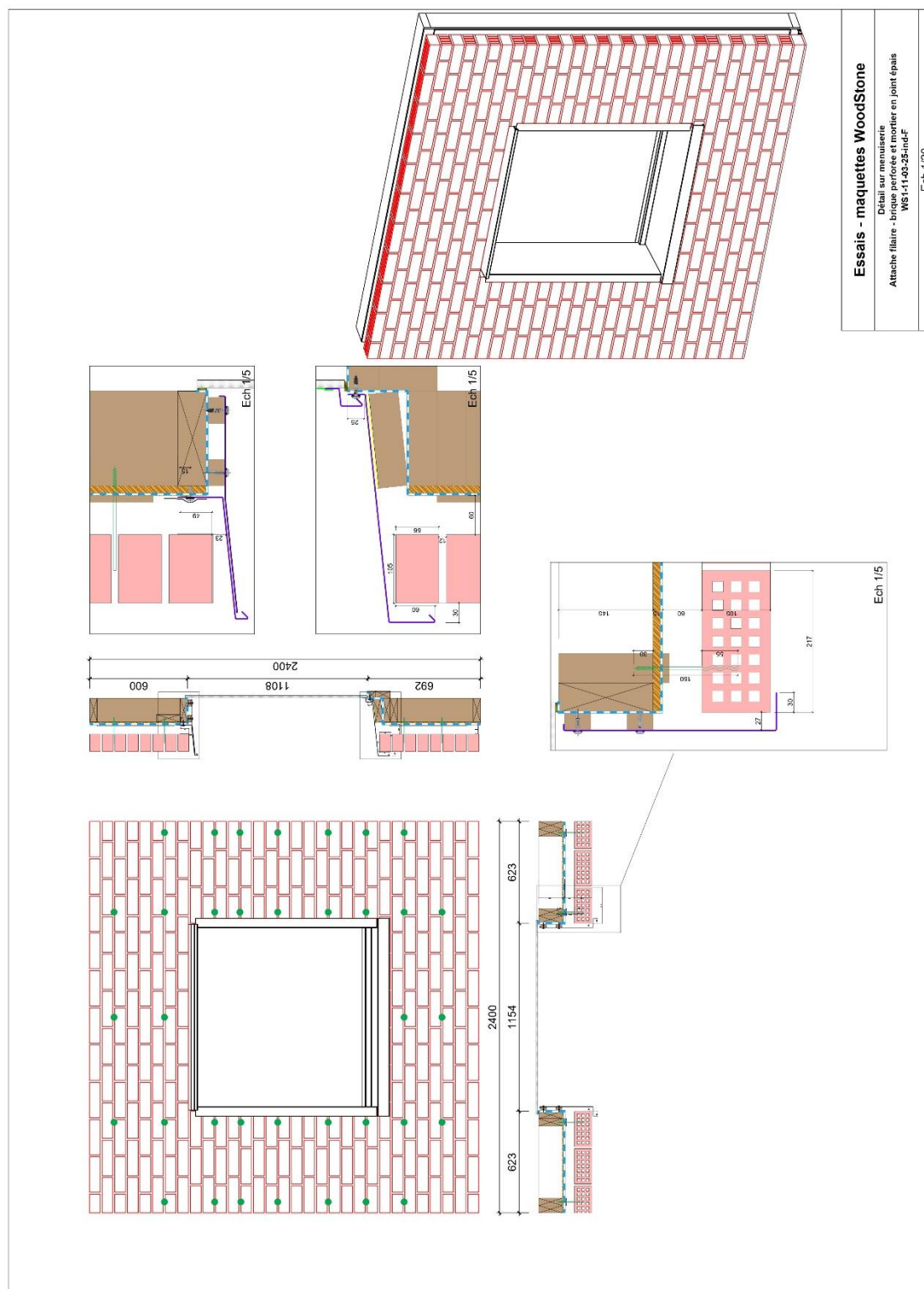
(a)* différentes longueur disponible selon la dimension de la cavité

A* percer un trou de 4 mm de diamètre, et 60 mm de profondeur

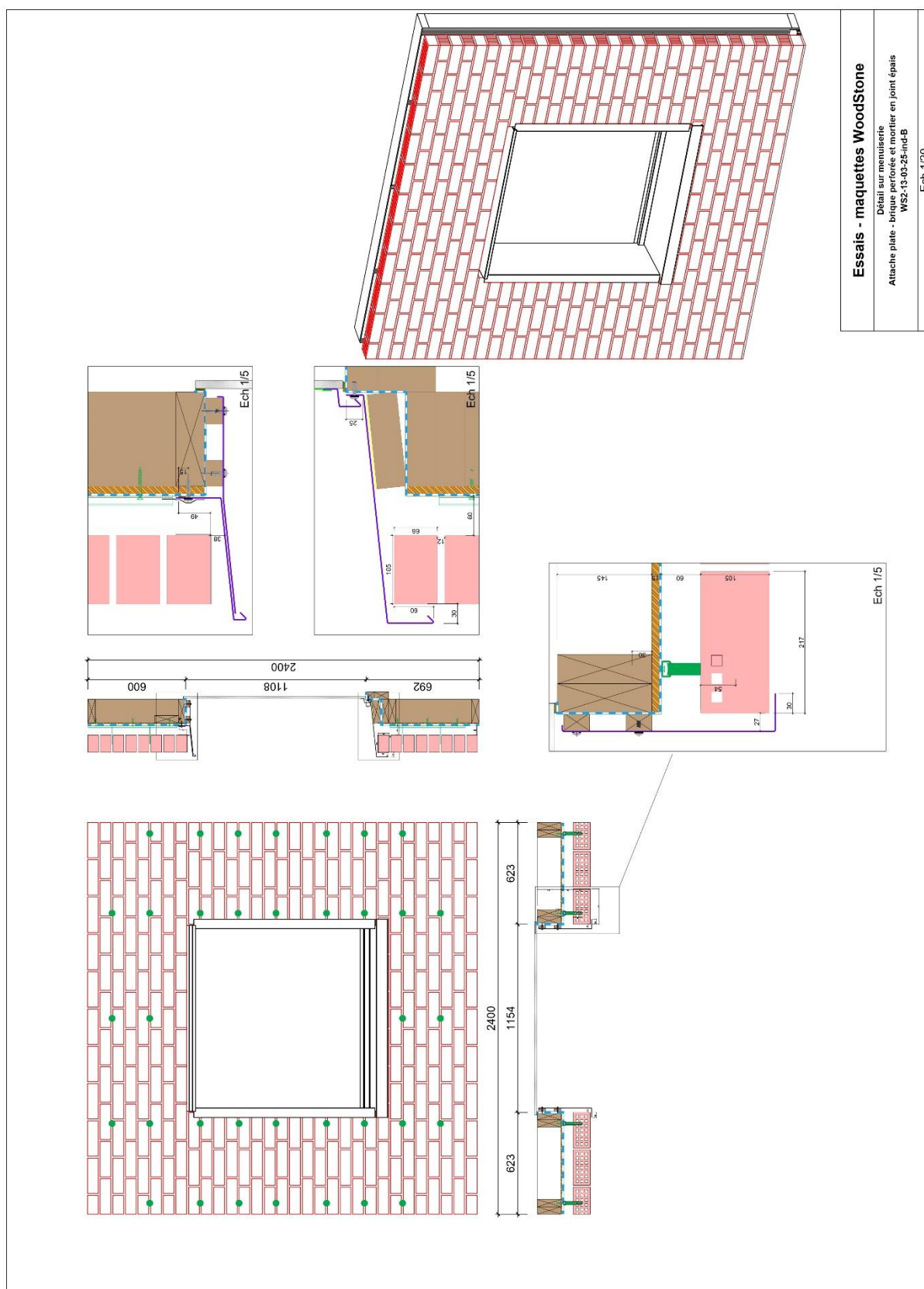
B** Classe de résistance 1 SIA 266/DIN 4074

C*** trou de fixation de 7 mm de diamètre, vis à bois 5 mm x 30 mm

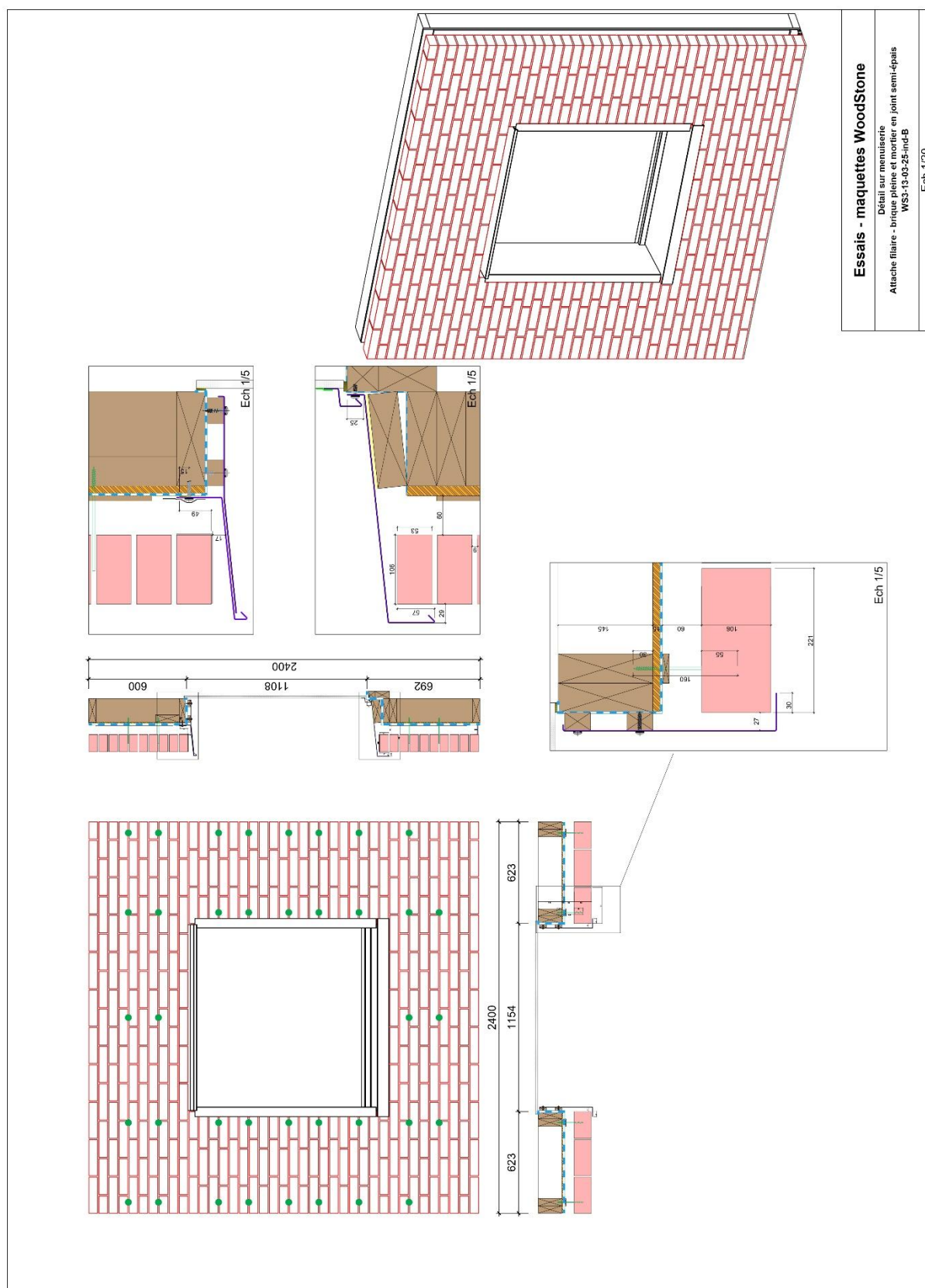
A2. Plans des maquettes – essais à grande échelle



WOODSTONE – Murs doubles en briques apparentes sur support en bois



WOODSTONE – Murs doubles en briques apparentes sur support en bois

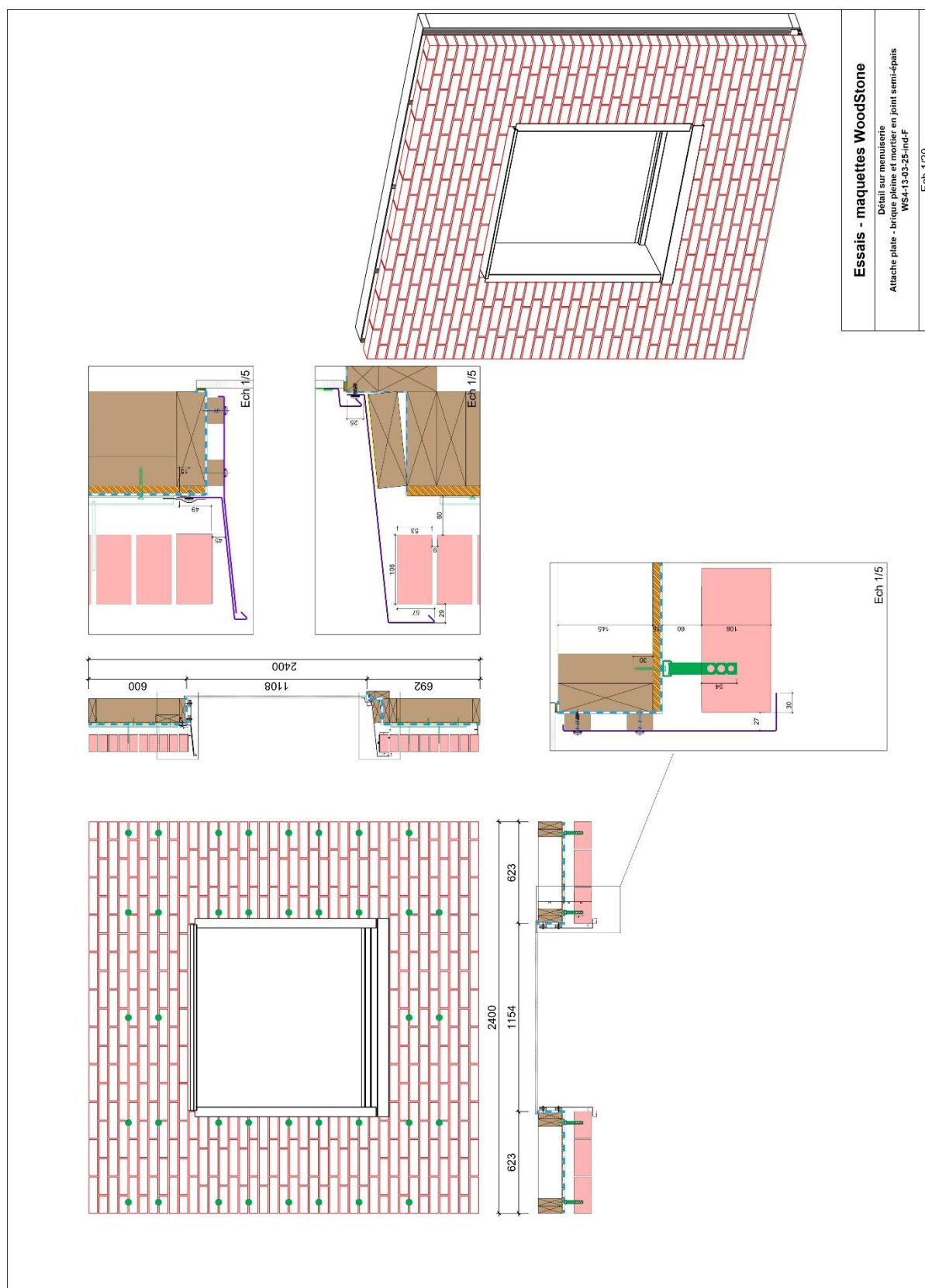


Essais - maquettes WoodStone

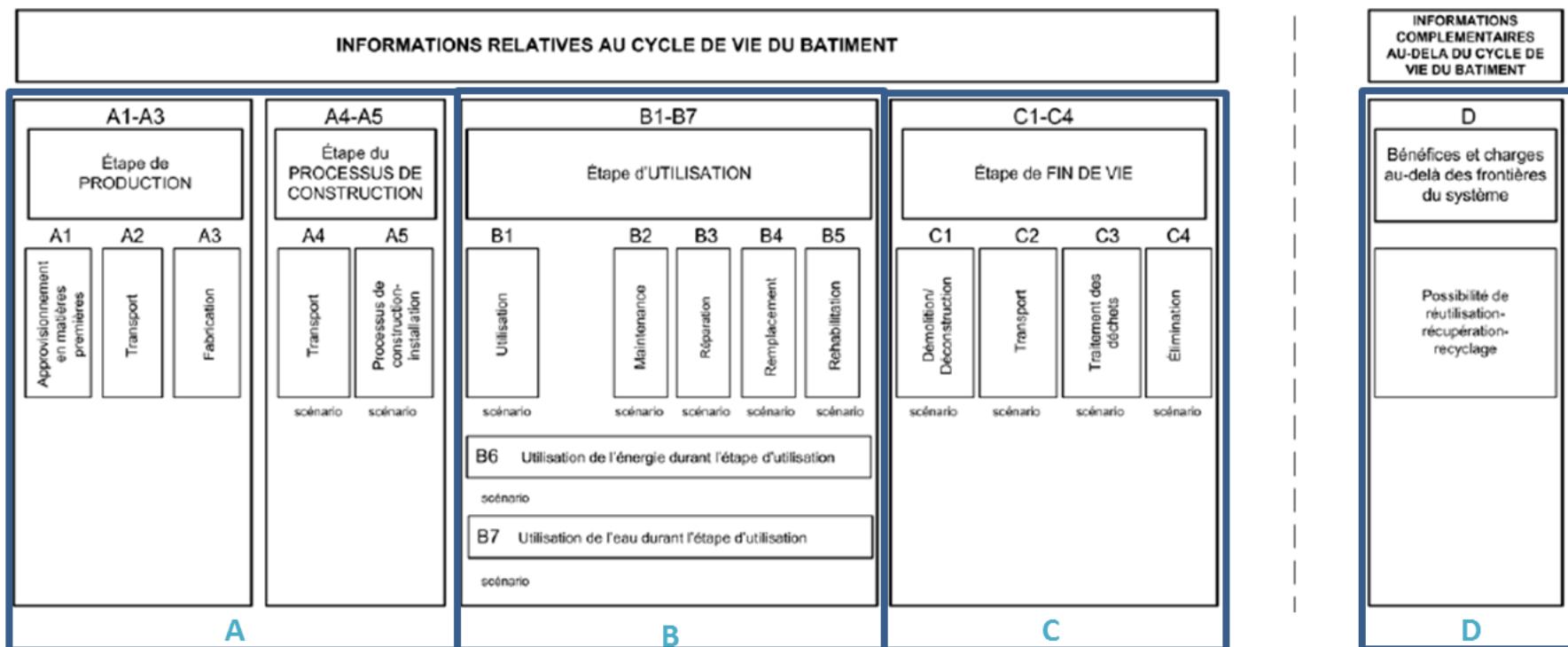
Détail sur menuiserie
Attache filaire - brique pleine et mortier en joint semi-épais
WS3-13-03-25-ind-B

Ech 1/20

WOODSTONE – Murs doubles en briques apparentes sur support en bois



A3. Description du cycle de vie d'un produit selon NF EN 15804+A2



A4. Résultats à l'échelle des murs doubles WOODSTONE (4,4 m² de paroi avec ouverture)

Les impacts détaillés de la configuration de mur double avec **attaches filaires** WOODSTONE pour 4,4m² de paroi (avec ouverture) sont présentés ci-dessous.

Composant		Changement climatique (kg CO ₂ éq. / paroi)		
		Total	Combustibles fossiles	Biogénique
A1A3	MOB	-1,05E+02	6,95E+01	-1,75E+02
	Briques	1,79E+02	1,79E+02	0
	Eléments en acier	4,70E+01	4,70E+01	0
	Attaches filaires + tasseaux	-2,24E+00	1,31E+00	-3,55E+00
A4	MOB	2,99E+00	2,99E+00	1,39E-03
	Briques	5,98E+00	5,98E+00	0
	Eléments en acier	1,61E+00	1,61E+00	4,87E-04
	Attaches filaires + tasseaux	1,78E-01	1,78E-01	5,38E-05
A5	MOB	1,04E+01	1,02E+01	2,22E-01
	Briques	4,12E+01	4,12E+01	0
C	MOB	1,94E+02	1,39E+01	1,80E+02
	Briques	7,66E+00	7,66E+00	0
	Eléments en acier	1,51E+00	1,51E+00	0
	Attaches filaires + tasseaux	3,84E+00	1,02E-01	3,74E+00
D	MOB	-6,74E+01	-6,53E+01	-2,04E+00
	Briques	-9,44E-01	-9,44E-01	0
	Eléments en acier	-1,63E+01	-1,63E+01	0
	Attaches filaires + tasseaux	-1,57E+00	-1,53E+00	-4,32E-02
TOTAL AC		3,89E+02	3,83E+02	5,93E+00
TOTAL AD		3,03E+02	2,98E+02	3,84E+00

Les impacts détaillés de la configuration de mur double avec **attaches plates** WOODSTONE pour 4,4m² de paroi (avec ouverture) sont présentés ci-dessous.

Composant		Changement climatique (kg CO ₂ éq. / paroi)		
		Total	Combustibles fossiles	Biogénique
A1A3	MOB	-1,05E+02	6,95E+01	-1,75E+02
	Briques	1,79E+02	1,79E+02	0
	Eléments en acier	4,70E+01	4,70E+01	0

WOODSTONE – Murs doubles en briques apparentes sur support en bois

	Attaches plates + rail	1,46E+01	1,46E+01	0
A4	MOB	2,99E+00	2,99E+00	1,39E-03
	Briques	5,98E+00	5,98E+00	0
	Eléments en acier	1,61E+00	1,61E+00	4,87E-04
	Attaches plates + rail	5,01E-01	5,01E-01	1,51E-04
A5	MOB	1,04E+01	1,02E+01	2,22E-01
	Briques	4,12E+01	4,12E+01	0
C	MOB	1,94E+02	1,39E+01	1,80E+02
	Briques	7,66E+00	7,66E+00	0
	Eléments en acier	1,51E+00	1,51E+00	0
	Attaches plates + rail	4,70E-01	4,70E-01	0
D	MOB	-6,74E+01	-6,53E+01	-2,04E+00
	Briques	-9,44E-01	-9,44E-01	0
	Eléments en acier	-1,63E+01	-1,63E+01	0
	Attaches plates + rail	-5,07E+00	-5,07E+00	0
TOTAL AC		4,03E+02	3,97E+02	5,74E+00
TOTAL AD		3,13E+02	3,09E+02	3,69E+00

A5. Résultats à l'échelle de 1 m² de murs doubles WOODSTONE (sans ouverture)

Les impacts détaillés de la configuration de mur double avec **attaches filaires** WOODSTONE pour 1m² de paroi (sans ouverture) sont présentés ci-dessous.

Composant		Changement climatique (kg CO ₂ éq. / m ²)		
		Total	Combustibles fossiles	Biogénique
A1A3	MOB	-1,84E+01	1,21E+01	-3,06E+01
	Briques	4,05E+01	4,05E+01	0
	Attaches filaires + tasseaux	-5,94E-01	3,02E-01	-8,97E-01
A4	MOB	6,15E-01	6,15E-01	2,96E-04
	Briques	1,35E+00	1,35E+00	0
	Attaches filaires + tasseaux	4,40E-02	4,40E-02	1,33E-05
A5	MOB	2,36E+00	2,31E+00	5,01E-02
	Briques	9,30E+00	9,30E+00	0
C	MOB	3,42E+01	2,65E+00	3,16E+01
	Briques	1,73E+00	1,73E+00	0
	Attaches filaires + tasseaux	9,70E-01	2,49E-02	9,45E-01
D	MOB	-1,18E+01	-1,14E+01	-3,58E-01
	Briques	-2,13E-01	-2,13E-01	0
	Attaches filaires + tasseaux	-3,87E-01	-3,76E-01	-1,09E-02
TOTAL AC		7,21E+01	7,09E+01	1,10E+00
TOTAL AD		5,97E+01	5,89E+01	7,31E-01

Les impacts détaillés de la configuration de mur double avec **attaches plates** WOODSTONE pour 1m² de paroi (sans ouverture) sont présentés ci-dessous.

Composant		Changement climatique (kg CO ₂ éq. / m ²)		
		Total	Combustibles fossiles	Biogénique
A1A3	MOB	-1,84E+01	1,21E+01	-3,06E+01
	Briques	4,05E+01	4,05E+01	0
	Attaches plates + rail	3,63E+00	3,63E+00	0
A4	MOB	6,15E-01	6,15E-01	2,96E-04
	Briques	1,35E+00	1,35E+00	0
	Attaches plates + rail	1,25E-01	1,25E-01	3,77E-05
A5	MOB	2,36E+00	2,31E+00	5,01E-02

WOODSTONE – Murs doubles en briques apparentes sur support en bois

	Briques	9,30E+00	9,30E+00	0
C	MOB	3,42E+01	2,65E+00	3,16E+01
	Briques	1,73E+00	1,73E+00	0
	Attaches plates + rail	1,17E-01	1,17E-01	0
D	MOB	-1,18E+01	-1,14E+01	-3,58E-01
	Briques	-2,13E-01	-2,13E-01	0
	Attaches plates + rail	-1,26E+00	-1,26E+00	0
TOTAL AC		7,55E+01	7,44E+01	1,05E+00
TOTAL AD		6,23E+01	6,15E+01	6,94E-01

Index des figures

Figure 1 - Schéma de principe d'un mur-double maçonné sur ossature bois	11
Figure 2 - Mur double à paroi externe filante devant les planchers. La légende 1 correspond aux attaches.	13
Figure 3 - Exemples de dispositions en pied de mur dans le cas de maçonneries non enduites (DTU 20.1 P1-1)	14
Figure 4 - Joint dit en "fermeture éclair" ou "en escalier".	15
Figure 5 - Densification des attaches à l'ouverture et en périphérie de maçonnerie (DTA 16/23-795_V1)	16
Figure 6 - Principe de densification des attaches à 90° au droit des ouvertures (ATEX-n° 3304_V1).....	17
Figure 7 - Principe du rail ANCON 25/14 et de l'attache à blocage de forme ANCON YD25 ou YP25 visé dans l'ATEX- n°2864_V2	18
Figure 8 - Illustration du mur-double dans le SCHL - Guide 'Construction de maison à ossature bois' - Canada	21
Figure 9 - Exemple de joint horizontal avec une cornière d'acier	22
Figure 10 - Linteau intermédiaire fixé nécessitant des joints de dilatation.....	23
Figure 11 - Brick Veneer / Wood stud wall	24
Figure 12 – Détails du linteau	25
Figure 13 – Paroi de type caisson pour mur double en brique apparente sur COB (selon CSTC-Contact 2017/4)	26
Figure 14 - modes de ruptures en traction [18].....	29
Figure 15 - Modes de rupture en compression [18]	29
Figure 16 – Carte du zonage sismique de la France.....	34
Figure 17 - Schéma de principe d'un mur-double maçonné sur ossature bois	36
Figure 18 - Coupe verticale d'un mur double maçonné sur ossature bois	36
Figure 19 - Coupe horizontale d'un mur double maçonné sur ossature bois.....	37
Figure 20 – Exemple de briques utilisées en mur double.....	38
Figure 21 - Variétés de type d'attaches adaptés aux murs doubles de maçonnerie de briques sur ossature bois.....	41
Figure 22 - Solution attache filaire + tasseaux (a) et attache plate + rail + vis (b)	42
Figure 23 - Exemple de procédé avec grilles pour assurer un débit d'air suffisant [30]	44
Figure 24 : Exemple de procédé avec briques perforées pour assurer un débit d'air suffisant [Images de Shutterstock]	44
Figure 25 - Schéma d'implantation des grilles d'aération en quinconces	45
Figure 26 - Exemple de procédé avec de retenu du mortier permettant l'écoulement d'eau et la ventilation de la lame d'air	45
Figure 27 - Traitement en pied de mur avec joints non garnis	46
Figure 28-: Traitement en pied de mur avec grille d'aération	47
Figure 29 - Exemple de conception entre larmier et cornière d'appui du mur maçonné	48
Figure 30 - Exemple de conception entre mur maçonné, bavette d'appui et calfeutrement	49
Figure 31 - Détail sur menuiserie avec encadrement rapporté en métal - exemple pour attache plate et rail	49
Figure 32 : Pose des bandes d'étanchéité dans le chevêtre – issu du calepin de chantier Réalisation des encadrements de baies et intégration des menuiseries dans les parois bois – programme PACTE	50
Figure 33 - Brique perforée pour montage à joint épais (en haut), et brique pleine pour montage à joint semi- épais (en bas).....	51
Figure 34 - Mortiers retenus, conditionnés en sac	53
Figure 35 - Plan de l'ossature en bois pour les essais à grande échelle	54
Figure 36 - Attaches (tiges anti-dévers) choisies pour l'étude	54
Figure 37 - Photo de l'attache filaire	55
Figure 38 - Photo de l'attache plate avec casse-goutte (sans rail)	55
Figure 39 - Positionnement des rails sur l'ossature bois	56
Figure 40 - Montage du mur maçonné	57

WOODSTONE – Murs doubles en briques apparentes sur support en bois

Figure 41 - Positionnement des attaches plates dans les rails selon le calepinage défini	57
Figure 42 - Positionnement des tasseaux sur l'ossature bois	58
Figure 43 - Montage du mur maçonné	58
Figure 44 - Vissage des attaches filaires dans les tasseaux selon le calepinage défini	58
Figure 45 – Brique perforée de type U (Brique TAIGA de la société Briqueteries du Nord) de dimensions 220 x 105 x 65 mm	64
Figure 46 –Brique pleine de type U (Brique Terre rouge HTR WF de la société Wienerberger) de dimensions 215 x 102 x 50 mm.....	64
Figure 47 - Essai de traction attache de maçonnerie	67
Figure 48 - Illustration de l'essai de traction sur attache avec rail.	68
Figure 49 - Schéma de montage des maquettes destinées aux essais de cisaillement	69
Figure 50 - Montage des éprouvettes pour l'essai de cisaillement sur briques perforées montées à joint épais (à gauche) et briques pleines montées à joint semi-épais (à droite).....	69
Figure 51 - Faciès de rupture des éprouvettes de cisaillement, brique perforée montée à joint épais	70
Figure 52 - Faciès de rupture des éprouvettes de cisaillement, brique pleine montée à joint semi-épais	71
Figure 53 – Essais de traction - Désolidarisation des maquettes une des interfaces brique mortier	74
Figure 54 – Essais de compression - Flambement de l'attache filaire après essai de compression sur doublets de briques perforées montées à joint épais & Désolidarisation d'une brique de certaines maquettes.	74
Figure 55 – Essais de traction - Désolidarisation des maquettes sur une des interfaces brique mortier & Désolidarisation de l'attache du joint de mortier.....	75
Figure 56 – Essais de traction - Désolidarisation des maquettes sur les 2 interfaces brique mortier & Désolidarisation de l'attache du joint de mortier.....	76
Figure 57 – Essais de traction - Désolidarisation de la maquette n°5 sur une des interfaces brique mortier. L'attache reste figée dans le joint de mortier.....	76
Figure 58 – Essais de compression - Flambage de l'attache des maquettes	76
Figure 59 – Essais de traction - Fissuration des maquettes à l'interface brique-mortier avec léger déplacement de l'attache et fissure sur une des briques	77
Figure 60 – Essais de compression - Désolidarisation des maquettes à l'interface brique mortier. Le mortier et l'attache restent en place sur une face de brique	78
Figure 61 – Essais de compression - Fissure des maquettes à l'interface brique mortier sans déformation ni déplacement de l'attache	78
Figure 62 – Essais de compression - Flambage de l'attache sans désolidarisation de la maquette ni fissuration du mortier.....	78
Figure 63 - Essais de traction - Désolidarisation des maquettes au niveau de l'interface brique-mortier. Une partie du mortier reste sur l'une des faces d'une des briques, le restant du mortier reste sur la face de la deuxième brique de la maquette. L'attache se déchausse du mortier	80
Figure 64 - Essais de traction - Désolidarisation des maquettes au niveau de l'interface brique-mortier. La quasi-totalité du mortier reste sur l'une des faces d'une des briques. L'attache se déchausse du mortier	80
Figure 65 - Essais de compression - Désolidarisation des maquettes au niveau de l'interface brique-mortier. Une partie du mortier reste sur l'une des faces d'une des briques. Une autre partie demeure sur l'autre face, et le reste du mortier et l'attache se désolidarisent du montage.	80
Figure 66 – Essais de compression - Flambage de l'attache sans fissuration du mortier.....	81
Figure 67 - attache plate avec et sans casse-goutte	82
Figure 68 – Détail d'un tronçon de rail	83
Figure 69 – Attache filaire.....	83
Figure 70 - Présentation de l'éprouvette testée (a) et du modèle numérique correspondant (b)	84
Figure 71 - Comparaison de tests de traction avec le modèle numérique	84
Figure 72 - Essai de traction attache filaire- (a) test expérimental (b) modélisation numérique.....	84
Figure 73 - Comparaison de test de traction avec le modèle numérique (attache filaire)	85
Figure 74 - Modélisation de l'essai de traction attache-rail(encastrement-libre-maillage1mm).....	86

WOODSTONE – Murs doubles en briques apparentes sur support en bois

Figure 75 - Résultats des essais de traction rail-attache plate	86
Figure 76 – Courbes contrainte-déformation du mortier PRB MJ VIF : Compression ; traction.....	87
Figure 77 - Endommagement du mortier PRB MJ VIF : Compression ; traction.....	87
Figure 78 - Superposition des courbes numériques et des courbes expérimentales de l'essai de cisaillement	88
Figure 79 - Modèle : Brique pleine-mortier-attache plate	89
Figure 80 - Comparaison du test de traction avec le modèle numérique du bloc complet dans le cas de faibles forces.	89
Figure 81 - Superposition des courbes numériques et des courbes expérimentales de l'essai de traction du modèle complet.	90
Figure 82 - Séparation du mortier avec l'attache filaire	91
Figure 83 - Superposition des courbes numériques et des courbes expérimentales de l'essai de traction du modèle complet. (Attache filaire).....	91
Figure 84 - Attache plate dans le rail centrée-excentrée	92
Figure 85 - Concentration des contraintes dans un coté du rail.....	92
Figure 86 - Traction attache centré et excentré	93
Figure 87 - Attache plate avec casse goutte et rail soumise à de la compression.....	93
Figure 88 - Compression attache plate avec et sans casse goutte	94
Figure 89 - Attache plate en compression	94
Figure 90 - Superposition des courbes numériques et des courbes expérimentales de l'essai de compression du modèle complet. (Attache plate).....	95
Figure 91 - Contraintes de compression et traction du mortier pour chaque éprouvette.....	95
Figure 92 - Loi d'endommagement du mortier pour chaque éprouvette	95
Figure 93 - Traction du modèle complet avec variation des paramètres du mortier	96
Figure 94 - Double goulotte en pied de mur dans la lame d'air	98
Figure 95 - Schéma de principe de l'essai	99
Figure 96 - Montage de l'essai de déformation différentielle	99
Figure 97 - Cycle de déformations par vérin.....	100
Figure 98 - Schéma de principe de l'essai de vieillissement mécanique cyclique de mise en parallélogramme	101
Figure 99 - Maquette d'essai avec baie pour l'essai de vieillissement mécanique cyclique	101
Figure 100 - Cycle de déformations	102
Figure 101 - Schéma de principe de l'essai	103
Figure 102 - Damier de calibration - A partir d'une série d'image de calibration, il est possible de créer une matrice de distorsion permettant de corriger chaque image pour que les lignes du damier soient bien droites.	106
Figure 103 – Obtention de chemin qui contiennent la position d'un point dans toute la séquence d'un essai.	107
Figure 104 - Courbe force-temps – attaches filaires - briques perforées (a) et briques pleines (b).....	107
Figure 105 - Déplacement d'ensemble de la maquette pendant l'essai de déformation différentielle - attaches filaires, brique pleine	108
Figure 106 - Déplacement du point n°6 au cours de l'essai (entouré en orange)	108
Figure 107 - Déplacement d'ensemble de la maquette pendant l'essai de mise en parallélogramme - attaches filaires, briques perforées.....	108
Figure 108 - Déplacement du point n°42 en fin d'essai (entouré en orange)	108
Figure 109 - Résultats de l'essai d'étanchéité à l'eau – attaches filaires	109
Figure 110 - Essais de déformation différentielle jusqu'à 30mm - attaches filaires, briques perforées	110
Figure 111 - Courbe force-temps – attaches plates - briques creuses (a) et briques pleines (b)	111
Figure 112 - Déplacement d'ensemble de la maquette pendant l'essai de déformation différentielle - attache plate, brique perforée	112
Figure 113 - Déplacement du point n°40 au cours de l'essai.....	112

Figure 114 - Déplacement d'ensemble de la maquette pendant l'essai de mise en parallélogramme - attache plate, brique perforée	112
Figure 115 - Déplacement du point n°78 au cours de l'essai.....	112
Figure 116 - Résultats de l'essai d'étanchéité à l'eau – attaches plates	113
Figure 117 - Essais de déformation différentielle jusqu'à 30mm - attaches plates, brique perforée	114
Figure 118 – Impact du cycle de vie des deux configurations sur l'indicateur changement climatique total (pour 4,4 m ² de paroi avec ouverture)	124
Figure 119 - Impact du cycle de vie des deux configurations sur l'indicateur changement climatique fossile (pour 4,4 m ² de paroi avec ouverture)	125
Figure 120 - Impact du cycle de vie des deux configurations sur l'indicateur changement climatique biogénique (pour 4,4 m ² de paroi avec ouverture)	125
Figure 121 - Impact des modules A1A3 pour les deux configurations sur les trois indicateurs de changement climatique (pour 4,4 m ² de paroi avec ouverture)	126
Figure 122 - Impact du module A5 pour les deux configurations sur l'indicateur de changement climatique total (pour 4,4 m ² de paroi avec ouverture)	127
Figure 123 - Impact du module C pour les deux configurations sur les trois indicateurs de changement climatique (pour 4,4 m ² de paroi avec ouverture)	128
Figure 124 - Impact du module D pour les deux configurations sur l'indicateur de changement climatique total (pour 4,4 m ² de paroi avec ouverture)	129
Figure 125 - Impact du cycle de vie des deux configurations sur l'indicateur changement climatique total (pour la 1 m ² de paroi sans ouverture)	130
Figure 126 - Impact du cycle de vie des deux configurations sur l'indicateur changement climatique fossile (pour 1 m ² de paroi sans ouverture)	131
Figure 127 - Impact du cycle de vie des deux configurations sur l'indicateur changement climatique biogénique (pour 1 m ² de paroi sans ouverture)	131

Index des tableaux

Tableau 1 – Portée admissible du linteau	25
Tableau 2 - Recommandations pour la taille de la lame d'air entre mur de parement en briques et ossature bois selon différentes sources (tableau non exhaustif)	27
Tableau 3 - Recommandations du nombre d'attaches de liaison entre le mur de parement en briques et l'ossature bois selon différentes sources (tableau non exhaustif)	27
Tableau 4 : Exigence de résistance à la pénétration de la pluie battante – selon le §8 du NF DTU 31.2 P1-1 [2].....	33
Tableau 5 : Catégories d'importance des bâtiments [22]	35
Tableau 6 : Domaine d'application de l'Eurocode 8 [23]	35
Tableau 7 - Dimensions standard de briques (Tableau non-exhaustif)	38
Tableau 8 - Résistances à la compression des mortiers de catégories M 10 et M 15 (NF EN 998-2)[27]	39
Tableau 9 : Exemples de nombre de rangées de joints non garnis minimum à prévoir pour deux types de briques, une épaisseur de joint vertical de 1cm et en fonction de la hauteur de mur visée pour assurer une ventilation suffisante	43
Tableau 10 : Exemples de nombre de grilles minimales à prévoir pour deux types de briques en fonction de la hauteur de mur visée pour assurer une ventilation suffisante	44
Tableau 11 - Caractéristiques déclarées des briques apparentes étudiées dans le cadre du projet (DoP).....	52
Tableau 12 - Caractéristiques déclarées des mortiers choisis pour l'étude	53
Tableau 13 - Liste des essais réalisés à petite échelle et leurs méthodes de référence	63
Tableau 14 - Configurations testées	63
Tableau 15 - Synthèse des résultats pour la résistance à la compression des briques	64

WOODSTONE – Murs doubles en briques apparentes sur support en bois

Tableau 16 - Synthèse des résultats des essais de caractérisation mécanique du mortier de montage 'PRB'	66
Tableau 17 - Synthèse des résultats des essais de caractérisation du mortier PRB MJ VIF.....	66
Tableau 18 : Module de Young du mortier PRB MJ VIF	66
Tableau 19 : Caractérisation mécanique de l'attache filaire	67
Tableau 20 - Caractérisation mécanique de l'attache plate	67
Tableau 21 - Synthèse des résultats des essais de cisaillement sur briques perforées Taiga de Briqueteries du Nord montées à joint épais avec le mortier de montage PRB.....	70
Tableau 22 - Synthèse des résultats des essais de cisaillement sur briques pleines Terre rouge HTR WF de Wienerberger montées à joint semi-épais à l'aide du mortier PRB MJ VIF.....	71
Tableau 23- Synthèse des résultats pour la configuration de l'attache filaire & briques perforées montées à joint épais avec le mortier de montage PRB.....	75
Tableau 24 - Synthèse des résultats pour la configuration de l'attache filaire & brique pleine et mortier en joint semi-épais PRB MJ VIF	77
Tableau 25 - Nombre minimal d'attaches par unité de surface de la configuration d'attache filaire - brique pleine et mortier de joint semi-épais PRB MJ VIF	77
Tableau 26 - Synthèse des résultats pour la configuration de l'attache plate - brique perforée et mortier de joint épais PRB MJ VIF	79
Tableau 27 - Nombre minimal d'attaches par unité de surface de la configuration d'attache plate - brique perforée et mortier de joint épais PRB MJ VIF	79
Tableau 28- Synthèse des résultats pour la configuration de l'attache plate - brique pleine et mortier de joint semi-épais PRB MJ VIF	81
Tableau 29 - Nombre minimal d'attaches par unité de surface de la configuration d'attache plate - brique pleine et mortier de joint semi-épais PRB MJ VIF	81
Tableau 30 – Raideurs entre la brique et le mortier.....	87
Tableau 31- Raideurs entre l'attache plate et le mortier	89
Tableau 32- Raideurs entre l'attache filaire et le mortier	90
Tableau 33: Comparaison des forces et des raideurs des trois éprouvettes avec celles issues du modèle complet.....	96
Tableau 34 - Configurations testées sur les essais grande échelle	97
Tableau 35 : Cycles d'aspersion de l'essai d'étanchéité à l'eau.....	104
Tableau 36 : Cycles de pression de l'essai de résistance à la charge due au vent	105
Tableau 37 : Conditions et Résultats de l'essai d'étanchéité à l'eau – attaches filaires et briques perforées	109
Tableau 38 et 39 : Conditions et Résultats de l'essai d'étanchéité à l'eau – attaches filaires briques perforée.....	113
Tableau 40 - Volumes d'eau projeté sur la maquette au cours de l'essai (L)	115
Tableau 41 - Volume d'eau récupéré dans les goulottes et comparaison au volume total projeté.....	115
Tableau 42 – Description des deux configurations de murs doubles brique / ossature en bois évaluées.....	118
Tableau 43 – Caractéristiques du MOB de référence considéré dans la FDES collective du CODIFAB.....	119
Tableau 44 – Hypothèses considérées concernant les modules A4 à D des tasseaux	120
Tableau 45 – Modélisation des flux considérés pour les modules A4 à D des tasseaux	120
Tableau 46 - Caractéristiques du mur en briques de référence considéré dans la FDES collective du CTMNC	121
Tableau 47 – Modules Ecoinvent utilisés pour évaluer les impacts environnementaux liés à la production des éléments en acier	122
Tableau 48 – Hypothèses considérées concernant les modules A4 à D des éléments en acier	122
Tableau 49 – Modélisation des flux considérés pour les modules A4 à D des éléments en acier	123
Tableau 50 – Description des deux configurations de murs doubles brique / ossature en bois évaluées pour 1 m ² de paroi.....	130
Tableau 51 - Propriétés déclarées par les fabricants des mortiers adaptés à la maçonnerie de terre cuite (non exhaustif)	142
Tableau 52 - Propriétés déclarées par les fabricants d'attaches adaptées à la maçonnerie de terre cuite sur ossature bois (non exhaustif)	145