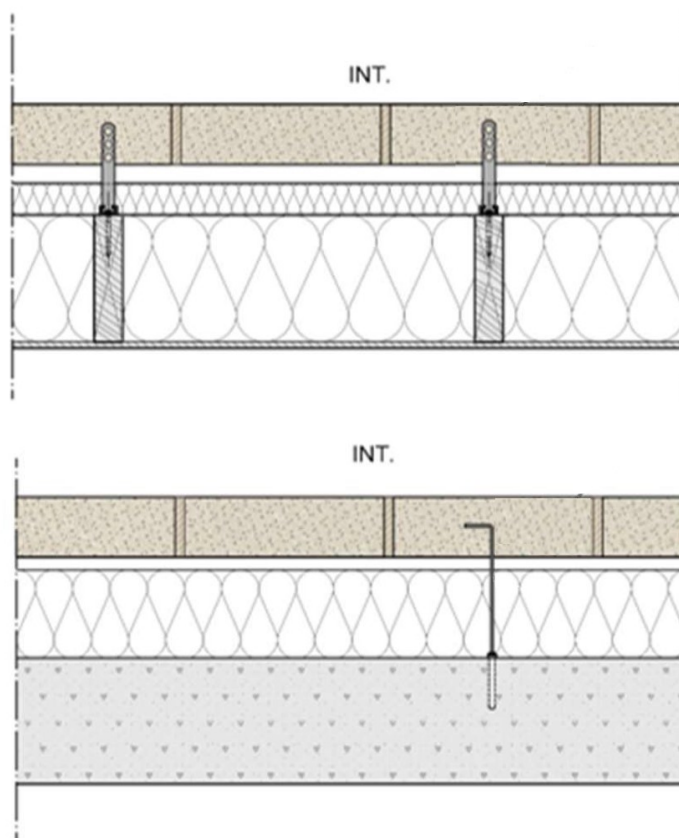


APPRECIATION TECHNIQUE D'EXPERIMENTATION

Numéro de référence CSTB : 2991_V1

ATEx de cas a

Validité du 01/02/2022 au 29/02/2024



Copyright : SCIC Cycle Terre

L'Appréciation Technique d'expérimentation (ATEx) est une simple opinion technique à dire d'experts, formulée en l'état des connaissances, sur la base d'un dossier technique produit par le demandeur. *(extrait de l'art. 24)*

A LA DEMANDE DE :

SCIC Cycle Terre

2 bis rue Paul Langevin 93270 Sevran

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BÂTIMENT

Siège social > 84 avenue Jean Jaurès – Champs-sur-Marne – 77447 Marne-la-Vallée cedex 2

Tél. : +33 (0)1 64 68 82 82 – Siret 775 688 229 00027 – www.cstb.fr

Établissement public à caractère industriel et commercial – RCS Meaux 775 688 229 – TVA FR 70 775 688 229

MARNE-LA-VALLÉE / PARIS / GRENOBLE / NANTES / SOPHIA ANTIPOLIS

Appréciation Technique d'Expérimentation n° 2991_V1

Note Liminaire : Cette Appréciation porte essentiellement sur le procédé de parement en maçonnerie de briques de terre compressée (BTC) Cycle Terre.

Selon l'avis du Comité d'Experts en date du 01 février 2022, le demandeur ayant été entendu, la demande d'ATEX ci-dessous définie :

- demandeur : SCIC Cycle Terre
- technique objet de l'expérimentation : Parements intérieurs maçonnés à base de briques de terre compressée stabilisée ou non stabilisée fixés par des attaches de liaisons à la paroi porteuse. Les murs porteurs peuvent être en béton conforme aux normes NF DTU 22.1 ou 23.1, en ossature bois conforme aux normes NF DTU 31.2 ou 31.4 et en maçonnerie conforme à la norme NF DTU 20.1.

Cette technique est définie dans le dossier enregistré au CSTB sous le numéro ATEX 2991_V1 et résumé dans la fiche sommaire d'identification ci-annexée,

donne lieu à une :

APPRECIATION TECHNIQUE FAVORABLE A L'EXPERIMENTATION

Remarque importante : Le caractère favorable de cette appréciation ne vaut que pour une durée limitée au **29/02/2024**, et est subordonné à la mise en application de l'ensemble des recommandations formulées aux §4.

Cette Appréciation, QUI N'A PAS VALEUR D'AVIS TECHNIQUE au sens de l'Arrêté du 21 mars 2012, découle des considérations suivantes :

1°) Sécurité

1.1 – Stabilité des ouvrages

La stabilité propre du parement intérieur en Briques de Terre Comprimée peut être normalement assurée. Ce parement ne participe pas à la stabilité d'ensemble du bâtiment, stabilité qui incombe à la structure porteuse en béton armé, en maçonnerie ou en ossature bois.

Le dimensionnement des attaches métalliques doit être mené sur la base des rapports d'essais fournis au cahier des charges, en utilisant un coefficient partiel matériau γ_m égal à 2,7 au sens de l'Annexe Nationale de la norme NF EN 1996-1-1. Les attaches de liaisons visées par cette Appréciation sont les attaches LSA-L de Halfen et SDV de Ancon. A défaut de justification par essai, les autres références d'attaches doivent faire l'objet d'essais et être conformes à la norme NF EN 845-1, à la norme NF EN 846-5 et aux prescriptions du cahier des charges.

Compte tenu des éléments de justification fournis dans le cahier des charges, et sous condition de respecter les limitations indiquées dans la présente Appréciation, la stabilité des parements intérieurs peut être assurée.

1.2 – Sécurité des intervenants

De ce point de vue, la mise en œuvre du procédé de parement est assez proche de celle des procédés traditionnels de petits éléments. Par conséquent, les mesures de sécurité habituelles aux chantiers de parements maçonnés permettent d'assurer la sécurité des intervenants.

1.3 – Sécurité en cas d'incendie

Compte tenu de la nature incombustible des matériaux constitutifs des Briques de Terre Comprimée et du mortier de joints, le procédé ne pose pas de problème particulier du point de vue de la réaction au feu.

Pour les ouvrages soumis à exigences réglementaires en matière de risque de propagation du feu en façade, une appréciation de laboratoire est à établir pour chaque chantier.

2°) Faisabilité

2.1 – Production

Appréciation Technique d'Expérimentation n° 2991_V1

La fabrication est réalisée dans l'atelier situé à l'adresse du demandeur. Cet atelier est spécialisé dans la fabrication des produits à base de terre objets de la présente ATEx. Des fabrications expérimentales ont été réalisées afin de fournir la matière première aux essais réalisés. Elles démontrent la faisabilité de la fabrication.

Le processus de fabrication allant de la sélection des terres jusqu'à la mise sur le marché est visé par un plan d'assurance qualité. Les valeurs des propriétés indiquées dans le cahier des charges sont à considérer comme des minima à atteindre sauf indication contraire.

2.2 – Mise en œuvre :

La mise en œuvre ne présente pas de difficulté majeure par rapport à un procédé de parement intérieur maçonné traditionnel. Il convient cependant que les ouvriers soient correctement formés avant d'entreprendre la mise en œuvre du procédé afin de bien appréhender les particularités décrites dans le cahier des charges.

Une attention particulière doit être portée au rythme de montage particulier des parements qui ne doit pas dépasser 10 fois l'épaisseur du mur (soit 0,95 m et 1,50 m), qui est à considérer dans la planification globale de l'opération.

2.3 – Assistance technique

Le demandeur de l'ATEx assure une assistance technique aux utilisateurs du procédé.

3°) Risques de désordres

Les risques de désordres liés à l'utilisation de terre crue sont maîtrisés. Ils sont principalement reliés au comportement à l'humidité de la terre, qu'elle soit stabilisée ou non. Les parements maçonnés sont autorisés dans les locaux EB et EB+P, uniquement sur les parois non exposées à des projections d'eau régulières de type ruissellement. Le cahier des charges propose des dispositions permettant de gérer ces risques notamment :

- Une assise de mortier en pied de 2 cm minimum dans tous les types de pièces ;
- L'utilisation de brique de terre compressée de type Rc4 pour les parements maçonnés de pièces humides en local (EB) ;
- L'utilisation de brique de terre compressée stabilisée pour les parements maçonnés de pièces humides en local (EB+P) ;
- D'augmenter d'une unité le nombre d'attaches en partie courante.

4°) Recommandations

Il est recommandé de :

- Compléter le plan d'assurance qualité de fabrication en y intégrant toutes les valeurs cibles et les tolérances (essais de type initiaux et essais de suivi). Les valeurs du cahier des charges ci-après sont à considérer comme des minima.
- De respecter les exigences du cahier des charges, lorsque le procédé est utilisé dans des lieux où le maître d'ouvrage considère qu'une sollicitation importante à l'abrasion est à prévoir ;
- Attirer l'attention de la Maîtrise d'Ouvrage sur les conditions d'entretien des parois en BTC apparentes qui ne doivent pas être nettoyées par utilisation d'eau sous pression.

EN CONCLUSION

En conclusion et sous réserve de la mise en application des recommandations ci-dessus, le Comité d'Experts considère que :

- La sécurité est assurée,
- La faisabilité est probable,
- Les risques de désordres sont limités.

Champs sur Marne,
Le Président du Comité d'Experts,

Ménad CHENAF

Appréciation Technique d'Expérimentation n° 2991_V1

ANNEXE 1

FICHE SOMMAIRE D'IDENTIFICATION (1)

Demandeur : SCIC Cycle Terre
2 bis rue Paul Langevin 93270 Sevrans

Définition de la technique objet de l'expérimentation :

Parements intérieurs maçonnés à base de briques de terre compressée stabilisée ou non stabilisée fixés par des attaches de liaisons à la paroi porteuse.

Les constituants principaux sont les Briques de terre compressée et le mortier de terre. Différents formats de briques existent permettant de réaliser des parois de 9,5 à 15 cm.

Deux catégories de briques sont fabriquées :

- Les blocs non stabilisés (BTC) : ils sont composés d'un mélange de terre argileuse et de sable de 0/2 mm à 0/4 mm (environ 35% en masse), permettant une correction granulaire ;
- Les blocs stabilisés (BTCS) : un liant hydraulique (environ 5% de ciment, en masse) est ajouté à la terre pour améliorer les performances des BTC, notamment la résistance à l'humidité et à l'abrasion.

Les caractéristiques mécaniques de briques sont :

- Classe minimum de résistance selon XP P13-901 : BTC 20 ;
- Résistance minimum garantie à l'état sec (mesurée selon la NF EN 772-1) : 2 MPa ;
- Résistance minimum garantie à l'état sec (BTCS uniquement) : 5 MPa ;
- Masse volumique apparente (selon XP P13-901) : BTC : 1,9 (+2 / - 0,1 kg/dm³) BTCS : 1,8 (+1,9 / - 0,1 kg/dm³) ;
- Résistance à l'abrasion minimum selon XP P13-901 : BTC 20 = 0,5 g/cm², BTC 40 = 0,2 g/cm² et BTCS = 0,05 g/cm².

Le mortier est produit avec les mêmes terres que les briques mais avec une correction granulaire différente (environ 70% en masse). Les briques stabilisées sont utilisées avec un mortier bâtard M2.5.

Mise en œuvre :

La mise en œuvre diffère assez peu de celle des procédés traditionnels. Quelques points d'attention doivent cependant être portés à la connaissance des utilisateurs réalisant leur première opération. Outre les dispositions constructives spécifiques, le rythme de montage particulier des parements (entre 0,95 m et 1,5 m) est à considérer dans la planification globale de l'opération.

Domaine d'emploi visé :

Les ouvrages visés sont les bâtiments destinés aux logements, à recevoir du public (ERP) et aux immeubles de bureaux, pour des conditions normales d'utilisation. Les locaux humides peuvent être de type EA et EB+P. Les ouvrages nécessitant des dispositions parasismiques au sens de l'arrêté du 22 octobre 2010 modifié ne sont pas visés.

(1) La description complète de la technique est donnée dans le dossier déposé au CSTB par le demandeur et enregistré sous le numéro ATEx 2991_V1 et dans le cahier des charges de conception et de mise en œuvre technique (cf. annexe 2) que le fabricant est tenu de communiquer aux utilisateurs du procédé.

ANNEXE 2

CAHIER DES CHARGES DE CONCEPTION ET DE MISE EN OEUVRE

Ce document comporte XX pages.

Procédé de murs de parement intérieur en briques de terre

« Dossier technique établi par le demandeur »

Version tenant compte des remarques formulées par le comité d'Experts

Datée du 01 février 2022

A été enregistré au CSTB sous le n° d'ATEX 2991_V1.

Fin du rapport

Appréciation Technique d'Expérimentation de type A

MUR DE PAREMENT INTERIEUR EN MAÇONNERIE DE BTC

DOSSIER TECHNIQUE LIÉ À L'ATEX DE TYPE A N°2991

VERSION DU 17 FEVRIER 2022

ÉQUIPE DE RÉDACTION

Eugénie CRÉTÉ, **AE&CC-ENSAG-UGA**
Arnaud MISSE, **CRAterre - Nama**
Mathilde CHAMODOT, **AE&CC-ENSAG-UGA, CRAterre**
Luis ARLEO, **AE&CC-ENSAG-UGA**
Thierry JOFFROY, **AE&CC-ENSAG-UGA**
Inès TOUZARD, **Nama**
Alix HUBERT, **CRAterre**
Bakonirina RAKOTOMAMONJY, **CRAterre**
Majid HAJMIRBABA, **CRAterre**

CONTRIBUTEURS

Patrick RIBET, **amàco**
Gabin WURTZ, **amàco**
Lionel RONSOUX, **amàco**
Cécile PLUMIER, **Vessière**
Bernard SCHMITT, **Vessière**
Samuel TOCHON-DANGUY, **LASA**
Pierre BRIE, **LASA**

Ce projet est cofinancé par le Fonds Européen de Développement Régional à travers l'Initiative Actions Innovatrices Urbaines



TABLE DES MATIÈRES

A. DESCRIPTION DU PROCÉDÉ	5
1. PRINCIPE	5
2. DOMAINE D'EMPLOI	6
2.1. TYPE D'OUVRAGE	6
2.2. ZONAGE SISMIQUE VISÉ	6
2.3. EMBLEMENTS AUTORISES	6
3. MATÉRIAUX	7
3.1. BLOCS DE TERRE COMPRIMÉE CYCLE TERRE	7
3.1.1. Caractéristiques des BTC(S)	7
3.1.2. Formes et dimensions des BTC Cycle Terre	8
3.2. MORTIERS DE POSE POUR BTC CYCLE TERRE	8
3.2.1. Constituants à ajouter	9
3.2.2. Caractéristiques des mortiers	9
3.3. ATTACHES DE LIAISON	9
3.4. ISOLANTS	11
4. DESCRIPTION DE LA FABRICATION	12
4.1. PRÉPARATION DE LA TERRE	12
4.1.1. Sélection et préparation de la terre	12
4.1.2. Stockage des matières premières	13
4.2. PROCESSUS DE FABRICATION DES BTC	13
4.2.1. Dosage et malaxage des matières premières	13
4.2.2. Compression	13
4.2.3. Palettisation	13
4.2.4. Cure et séchage des matériaux produits	13
4.2.5. Conditionnement et stockage	14
4.3. PROCESSUS DE FABRICATION DU MORTIER	14
4.3.1. Dosage et mélange des matières premières	14
4.3.2. Conditionnement et stockage	14
4.4. CONDITIONS DE TRANSPORT DES PRODUITS	14
4.5. CONTRÔLES	15
5. DIMENSIONNEMENT ET CONCEPTION	16
5.1. PRINCIPES DE CONCEPTION	16
5.2. DIMENSIONNEMENT	18
5.2.1. Épaisseur, élancement et longueur de maçonnerie	18
5.2.2. Longueur et répartition des attaches	18
5.2.3. Dimensionnement de la lame d'air	19
5.3. DÉTAILS TECHNIQUES	20
5.3.1. Appareillage - calepinage	20
5.3.2. Attaches de liaison entre parement BTC et mur support	21

5.3.3. Jonction avec le sol / support	21
5.3.4. Jonction avec le plancher haut	23
5.3.5. Jonction avec les autres parois verticales	24
5.3.6. Fractionnement des murs par des joints de tassement, retrait ou de dilatation	24
5.3.7. Jonction avec les huisseries	25
5.3.8. Passage des réseaux	30
5.3.9. Fixation de charges non structurelles	31
5.3.10. Pièces humides	31
6. MISE EN ŒUVRE	32
6.1. PRÉPARATION DU CHANTIER ET CONDITIONS DE MISE EN ŒUVRE	32
6.1.1. Préparation du chantier	32
6.1.2. Conditions de mise en œuvre	33
6.2. PRÉPARATIONS POUR LA MAÇONNERIE BTC	33
6.2.1. Interfaces	33
6.2.2. Gâchage et utilisation des mortiers	33
6.3. POSE DES BTC	33
6.3.1. Démarrage de la maçonnerie	34
6.3.2. Pose des BTC en partie courante	34
6.3.3. Cadence de pose et limite d'élévation quotidienne	34
6.3.4. Mise en œuvre des attaches	34
6.3.5. Coupe, taille, perçage	35
6.3.6. Jointoiement	35
6.3.7. Dernier rang de maçonnerie	35
6.4. FINITION DE LA MAÇONNERIE	36
6.4.1. Préparation	36
6.4.2. Finitions	36
6.5. ENTRETIEN	37
7. COMMERCIALISATION DU PROCÉDÉ	38
8. FORMATION DES ENTREPRISES	38
B. JUSTIFICATIONS TECHNIQUES	39
1. SATISFATIONS AUX LOIS ET REGLEMENTATIONS EN VIGUEUR	39
1.1. STABILITÉ ET RÉSISTANCE MÉCANIQUE	39
1.1.1. Résistance à la compression des BTC(S)	39
1.1.2. Résistance à la compression du mortier	39
1.1.3. Résistance à la flexion de la maçonnerie	40
1.1.4. Résistance au cisaillement de la maçonnerie	40
1.1.5. Résistance des attaches métalliques	40
1.1.6. Synthèse de la note de calcul pour parement intérieur	41
1.2. STABILITÉ PARASISMIQUE	42
1.3. SÉCURITÉ EN CAS D'INCENDIE	42
1.4. ISOLATION THERMIQUE	42
1.5. AFFAIBLISSEMENT ACOUSTIQUE	42
2. APPRÉCIATION DE L'APTITUDE À L'EMPLOI	43

2.1. ESSAIS DE CHOCS	43
2.2. ESSAI D'ACCROCHAGE-FIXATIONS DE CHARGES LOURDES	44
2.3. MESURES DE RETRAIT ET DE TASSEMENT	45
2.4. JUSTIFICATION DE LA COMPATIBILITE DES DEFORMATIONS DE L'OSSATURE ET DU PAREMENT	46
2.5. ESSAIS D'ARRACHEMENT D'ENDUITS	46
2.6. JUSTIFICATION DU COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE DU COMPLEXE DE FACADE	46

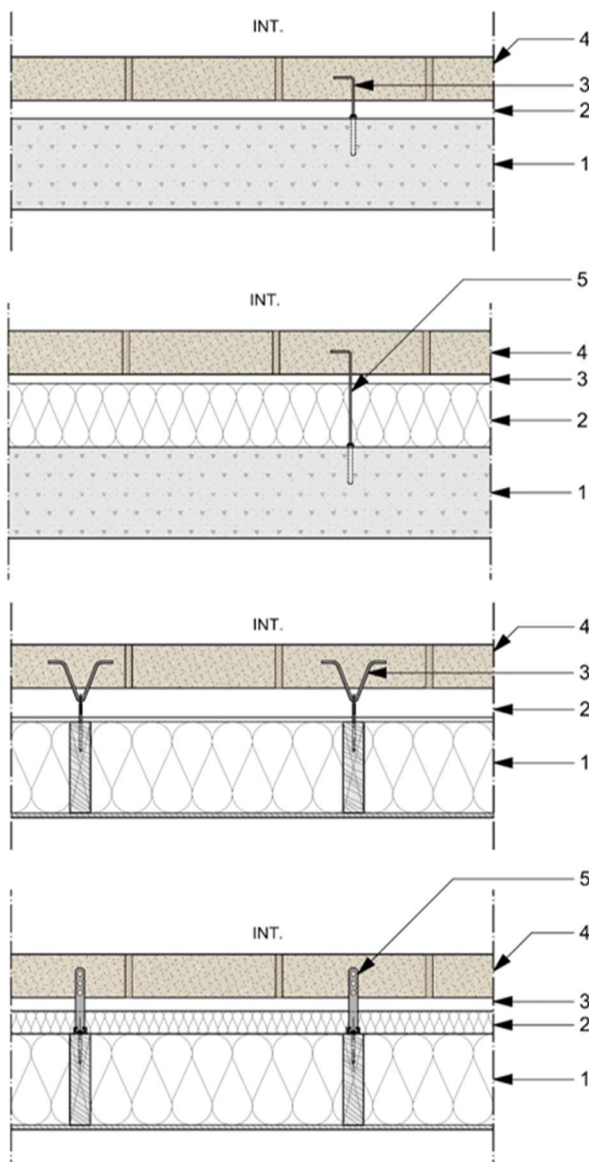
A. DESCRIPTION DU PROCÉDÉ

1. PRINCIPE

Cette demande d'ATEx de type A porte sur la réalisation de murs non porteurs en blocs de terre comprimée (BTC) produits par Cycle Terre selon la norme XP P13-901, en parement intérieur.

L'épaisseur du parement est comprise entre 9,5 et 15 cm. La stabilité du parement est assurée par des attaches de liaison fixées à la paroi porteuse. Une lame d'air se situe entre le mur support et le parement. Un isolant peut remplir partiellement ce vide.

Le mur porteur support du parement n'est pas visé par cette ATEx. Il est soit en béton (conforme aux DTU 22.1 ou 23.1), soit en maçonnerie (conforme au DTU 20.1), soit en ossature bois (conforme aux DTU 31.2 ou 31.4).



1. Mur support en béton ou maçonnerie, éventuellement doublé d'un isolant thermique extérieur
2. Lame d'air
3. Attache de liaison métallique
4. Parement BTC

1. Mur support en béton ou maçonnerie, éventuellement doublé d'un isolant thermique extérieur
2. Isolant thermique intérieur
3. Lame d'air
4. Parement BTC
5. Attache de liaison métallique

1. Mur support en ossature bois, éventuellement doublé d'un isolant thermique extérieur
2. Lame d'air
3. Attache de liaison métallique
4. Parement BTC

1. Mur support en ossature bois, éventuellement doublé d'un isolant thermique extérieur
2. Isolant thermique intérieur
3. Lame d'air
4. Parement BTC
5. Attache de liaison métallique

Fig. 1 : Schémas de principe du parement maçonné en BTC

2. DOMAINE D'EMPLOI

2.1. TYPE D'OUVRAGE

Tous les types de constructions courantes sont visés : ERP, maisons individuelles, bâtiment de logements en collectif, bâtiments pour bureaux, constructions scolaires et tous types de bâtiments à usage commercial, industriel ou agricole.

Les parements en BTC Cycle Terre peuvent être appliqués sur murs supports:

- en béton banché conformes aux DTU 22.1 ou 23.1 ;
- en maçonnerie de petits éléments conformes au DTU 20.1 ;
- en ossature bois conformes aux DTU 31.2 ou 31.4.

2.2. ZONAGE SISMIQUE VISÉ

L'utilisation du parement objet de cette ATEx est limitée aux programmes pour lesquels aucune vérification n'est requise selon l'article 3 de l'arrêté du 22 octobre 2010.

2.3. EMPLACEMENTS AUTORISES

Le parement maçonné en BTC est autorisé entre locaux chauffés et non-chauffés et en parement intérieur de façade. Le concepteur se réfèrera aux règles de l'art et à la réglementation thermique concernant le choix de l'éventuel isolant et ses caractéristiques.

L'usage des parements décrits dans cette ATEx est permis dans les locaux classés¹ EA (locaux secs ou faiblement humides) ou EB (locaux moyennement humides). Le parement maçonné est autorisé en local EB+P uniquement sur les parois non exposées à des projections d'eau régulières et sous réserve d'utiliser des BTCS et du mortier stabilisé (Cycle Terre ou M2,5 selon EC6) pour la réalisation du parement.

L'utilisation du procédé pour des locaux classés EB+ collectifs et EC n'est pas visée par la présente ATEx.

La ventilation des locaux chauffés devra garantir que le taux d'humidité relative moyen journalier prévisible ne dépasse pas 80% pendant plus de sept jours d'affilée².

¹ Au sens du document « Classement des locaux en fonction de l'exposition à l'humidité des parois » (e-cahier CSTB 3567 – mai 2006).

² Limiter la durée d'exposition à 80% d'humidité relative permet de limiter le risque que la maçonnerie atteigne sa teneur en eau d'équilibre dans ces conditions (estimée à 3%) (cf. B.1 et B.2.6).

3. MATÉRIAUX

3.1. BLOCS DE TERRE COMPRIMÉE CYCLE TERRE

Les BTC Cycle Terre utilisés pour la réalisation des parements sont des blocs pleins sans emboîtement conformes à la norme XP P13-901. Ils sont obtenus par compression de terre à l'état humide suivie d'un démoulage immédiat.

Les BTC Cycle Terre utilisables pour la réalisation des parements objet de cette ATEx sont de deux types :

- **Les blocs non stabilisés (BTC)** : ils sont composés d'un mélange de terre argileuse et de sable de 0/2 mm à 0/4 mm (environ 35% en masse), permettant une correction granulaire³ ;
- **Les blocs stabilisés (BTCS)** : un liant hydraulique (environ 5% de ciment, en masse) est ajouté à la terre pour améliorer les performances des BTC, en particulier leur résistance à l'humidité et à l'abrasion.

Les détails et dimensionnements maximum décrits dans cette ATEx se réfèrent à une maçonnerie en BTC non-stabilisé. Il est possible de remplacer la maçonnerie non-stabilisée par de la maçonnerie stabilisée, dont les caractéristiques mécaniques sont plus favorables. L'usage de BTCS est en particulier obligatoire dans le cas où de la maçonnerie de terre crue serait utilisée dans des locaux classés EB+P.

3.1.1. CARACTERISTIQUES DES BTC(S)

Tableau 1 : Synthèse des principales caractéristiques des BTC(S) Cycle Terre

	BTC		BTCS
Classe de résistance selon XP P13-901	Rc2	Rc4	Rc5
Masse volumique apparente (selon XP P13-901)	Mv 1,9 (2 +/- 0,1 kg/dm ³)		Mv 1,8 (1,9 +/- 0,1 kg/dm ³)
Résistance minimum garantie (mesurée selon la NF EN 772-1)	Etat sec : 2 Mpa	Etat sec : 4 Mpa Etat humide ⁴ : 3 MPa	Etat sec : 5 Mpa Etat humide ⁵ : 3,5 MPa
Comportement sous l'effet du gel et de l'humidité⁶ (selon XP P13-901)	Classe 3		Classe 2
Résistance à l'abrasion minimum garantie (selon XP P13-901)	0,5g/cm ²	0,2g/cm ²	0,05g/cm ²
Résistance aux chocs durs (selon NF P 08-301)	Classement Q3 ⁷		

Dans le cas de parement intérieur, conformément au cahier 3546_V2 de février 2008 du CSTB, le classement Q3 en résistance aux chocs durs suffit à une mise en œuvre en tout emplacement, y compris en rez-de-chaussée non protégé, y compris en ERP. Des seuils minimums de résistance à l'abrasion (voire une protection mécanique du mur) sont proposés en fonction de l'exposition des parois à l'érosion de passage (cf. A.5.1).

Il est demandé d'utiliser des BTC de type Rc4 dans les locaux moyennement humides(EB) et des BTCS dans les locaux humides (EB+P) (cf. A.5.3.10).

Ces valeurs sont garanties par le plan d'assurance Qualité de la Fabrique Cycle Terre.

Remarque : La norme XP P13-901 (version initiale datée de 2001) est l'objet d'une mise à jour en 2022. Les valeurs et classements indiqués correspondent à la version 2022.

³ Les granulats pour BTC sont conformes à la norme NF EN 13139.

⁴ L'état humide pour les BTC est défini à 3% de teneur en eau (les simulations hygrométriques des parois montrent une teneur en eau maximale de 2,7% en locaux humides, cf. B.2.7).

⁵ L'état humide pour les BTCS est défini à 13% de teneur en eau (correspondant à 2h d'immersion des BTCS).

⁶ L'obtention de la classe 3 implique des essais de résistance à l'humidité par contact ; l'obtention de la classe 2 implique des essais de résistance à l'humidité par contact, des essais d'immersion et des essais au gel.

⁷ Classement selon le cahier CSTB 3546_V2 de février 2008

3.1.2. FORMES ET DIMENSIONS DES BTC CYCLE TERRE

Les BTC Cycle Terre utilisés pour les parements sont des blocs parallélépipédiques pleins (format classique) ou avec empreintes (formats classique et parement). Ils peuvent être classés dans le groupe 1, Éléments pleins ou constitués de trous de faible importance selon l'Eurocode 6⁸.

Leurs dimensions⁹ (mesurées selon XP P13-901) sont :

- L 315 x l 150 x h 95 mm pour les BTC Cycle Terre format "classique",
- L 315 x l 95 x h 95 mm pour les BTC Cycle Terre format "parement".

Les tolérances dimensionnelles sont celles de la XP P13-901 (+/- 3mm sur chaque dimension).

D'autres formats de BTC peuvent être produits à la demande pour utilisation dans le cadre de cette ATEX. Ces blocs devront respecter les consignes suivantes :

- Aucune dimension ne pourra être inférieure à 60mm (hors découpe de bloc pour les besoins du calepinage) ;
- L'élancement maximal des BTC est de 5 ;
- La longueur maximale des BTC est de 45cm.

Empreintes

Les BTC de format parement sont munis d'empreintes en creux, de dimensions 250 x 20 x 8 mm, situées sur les deux faces de pose des BTC. Les BTC de format classique sont proposés avec ou sans empreintes. La ou les faces vues sont réalisées de manière à constituer le parement fini du mur.

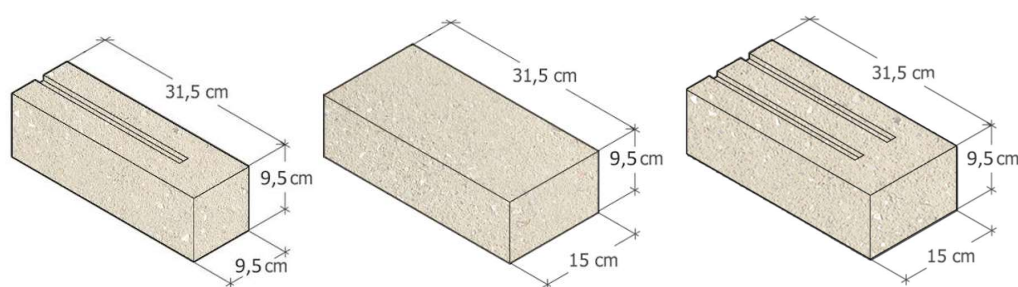


Fig. 2 : BTC Cycle Terre utilisés pour les cloisons : format parement avec empreinte, format classique sans empreinte, format classique avec empreintes

3.2. MORTIERS DE POSE POUR BTC CYCLE TERRE

La pose des BTC est exécutée avec le mortier à BTC "terre" Cycle Terre prêt à l'emploi.

Le mortier pour BTC Cycle terre est composé d'un mélange de terre argileuse, identique à la terre des BTC, et de sable¹⁰ permettant une correction granulaire. La fraction sableuse est plus importante afin d'améliorer la maniabilité tout en diminuant le retrait (environ 70% en masse). Le sable utilisé est un sable 0/2 mm à 0/4 mm.

Dans le cas où des BTC stabilisés seraient utilisés, il est recommandé d'utiliser soit un mortier bâtard de type M2,5 préparé conformément aux descriptions de l'annexe nationale de l'EC6, soit le mortier terre Cycle Terre stabilisé par ajout de 15% (en masse) de ciment.

Les joints ont une épaisseur (e) comprise entre 10 mm minimum et 15 mm maximum.

⁸ Tableau 3.1 de l'Eurocode 6 - groupe 1 : bloc dont le pourcentage de volume des alvéoles (trous, réservation, évidemment...) est inférieur à 25 %.

⁹ Les tolérances dimensionnelles sont celles de la XP P13-901 : +/- 3mm.

¹⁰ Les granulats pour mortiers sont conformes à la norme NF EN 13139.

3.2.1. CONSTITUANTS A AJOUTER

Liants :

Les caractéristiques mécaniques¹¹ du mortier de pose doivent être adaptées aux BTC utilisés : classe de résistance et stabilisation. Dans le cas de BTC stabilisés, le même liant entrant dans la composition des blocs (ciment) doit être ajouté au mortier sur chantier, suivant le dosage de recette Cycle Terre prescrit. Le liant doit porter le marquage CE.

Eau de gâchage :

L'eau de gâchage d'un mortier doit être propre (eau claire et non acide).

L'eau de gâchage doit répondre aux prescriptions de la norme NF EN 1008.

L'eau potable convient pour la réalisation des mortiers.

3.2.2. CARACTERISTIQUES DES MORTIERS

Le mortier Cycle Terre préconisé pour la réalisation des parements présentent les performances suivantes :

Tableau 2 : Principales caractéristiques du mortier Cycle Terre

Caractéristiques	Mortier	Protocole de mesure
Masse volumique sèche	1750 kg/m ³	Mesurée selon EN 1015-6
Résistance en compression	2 MPa	Mesurée selon EN 1015-11
Résistance à la traction (par flexion) ¹²	0,6 MPa	Mesurée selon EN 1015-11

Mortier pour jointoiment après coup de maçonnerie apparente :

Dans le cas où un mortier de jointoiment après coup serait utilisé, ce mortier ne pourra pas présenter une résistance mécanique supérieure au mortier de pose. De même, les liants ne pourront pas être de classe de résistance supérieure à celui utilisé pour le montage.

3.3. ATTACHES DE LIAISON

Tous les éléments métalliques doivent être conformes à la norme NF EN 845-1 « Spécification pour composants accessoires de maçonnerie ».

Le choix des attaches de liaison dépend des mouvements différentiels prévisibles entre la maçonnerie de parement et son mur support (cf. tableau 6 du § A.5.2.2). Plusieurs types d'attaches ont été l'objet de mesures permettant leur utilisation sans essais supplémentaires :

- LSA-L de Halfen ou équivalent ;
- SPV (ou SDV), SP28 (ou SD28) ou TFMT de Ancon ou équivalent.

Ces attaches ont une extrémité noyées dans l'épaisseur des joints de montage horizontaux du parement et l'autre extrémité fixée au mur support (selon prescriptions du fabricant).

Description des attaches LSA-L de Halfen :

Diamètre : 4 mm

Longueur : 235 mm (gamme de cavité entre le mur support et le mur de parement comprise entre 20 et 150 mm).

¹¹ Les mortiers seront caractérisés (résistance à la compression) sur la base de la norme NF EN 1015-11.

¹² Cette valeur est donnée à titre indicatif. Elle n'est pas utilisée dans les justifications techniques.

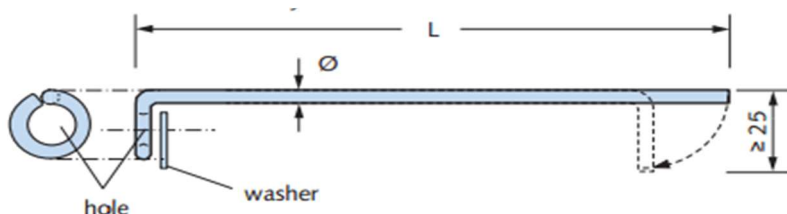


Fig. 3 : Attache de liaison pour maçonnerie LSA-L HALFEN (Dessin : Halfen)

Description des attaches SPV (SDV) de Ancon

Longueur comprise entre 125 et 300mm (gamme de cavité entre le mur support et le mur de parement comprise entre 50 et 225 mm)

Largeur : 18mm

Trou oblong de 8 x 30 mm pour la fixation dans le mur support

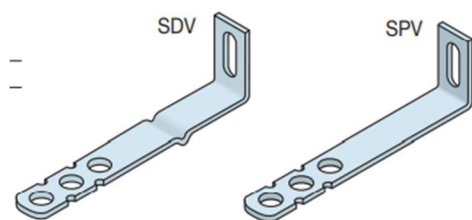


Fig. 4 : Attaches de liaison pour maçonnerie SDV et SPV de Ancon (Dessin : Ancon)

Description des attaches SP28 (SD28) et TFMT de Ancon

Longueur comprise entre 75 et 300mm

Largeur : 18mm

Gamme de cavité :

SP28 : 10 – 130mm

TFMT : 50 – 150mm

SD28 : 50 – 230mm

Utilisation avec un rail de fixation (maçonné, coulé ou fixé en surface) de longueur 100 mm (modèle TFMT ou rail Ancon Fastrack pour maçonnerie creuse) ou comprise entre 1000 et 3000 mm (modèles SD28 / SP28).

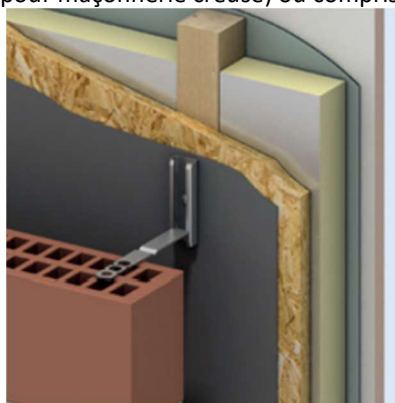


Fig. 5 : Attaches de liaison pour maçonnerie TFMT de Ancon (Dessin : Ancon)

Autres références d'attaches

Dans le cas où l'usage d'autres références d'attaches serait souhaité, celles-ci devront :

- être conformes à la NF EN 845-1 (2013) : *Spécifications pour composants et accessoires de maçonnerie : Partie 1: attaches, brides de fixation, étriers de support et consoles*. Cette norme européenne précise les exigences imposées aux agrafes utilisées pour l'interconnexion de la maçonnerie et pour la connexion de maçonnerie avec des poutrelles, des poteaux ou d'autres parties du bâtiment. Les matériaux, tolérances, variations d'attaches et exigences en matière de valeurs déclarées sont tous couverts par cette norme.

- être testées à l'arrachement selon la norme NF EN 846-5 sur des échantillons de maçonnerie composés de BTC et mortier Cycle Terre. Cette norme préconise deux sens de chargement : en traction et en compression. Le nombre d'attaches par m² devra être adapté en fonction des résultats des mesures de résistance à l'arrachement ;
- avoir une épaisseur ou un diamètre inférieur ou égal à la moitié de l'épaisseur du joint de montage.

De plus, la définition du nombre d'attaches devra être réalisée en considérant un coefficient de sécurité γ_m de 2,7 (au sens de l'Annexe Nationale de la NF EN 1996-1-1), un coefficient de passage de l'action caractéristique à l'action pondérée du vent à l'ELU de 1,5, et un coefficient de passage de la valeur moyenne mesurée à la valeur caractéristique de 0,7 (conformément au DTU 20.1 P3) (cf. B.1.1.6).

Remarque : Les attaches AMR de Ancon sont des attaches articulées adaptées à des murs support bois, briques ou béton. Cette composition en 2 parties lui permet d'absorber des mouvements différentiels importants dans les 3 directions de sollicitation. Gamme de cavité : 40 – 400 mm

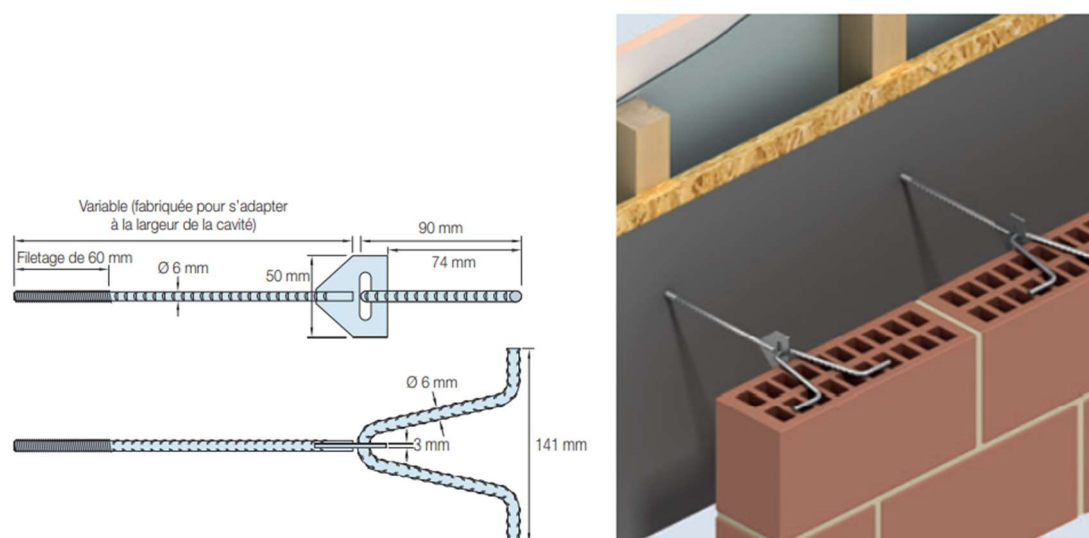


Fig. 6 : Attaches de liaison pour maçonnerie AMR de Ancon (Dessin : Ancon)

3.4. ISOLANTS

Les caractéristiques thermiques et acoustiques de l'isolant sont laissées à l'appréciation de la maîtrise d'œuvre de l'opération. Les isolants et leur mise en œuvre doivent être validés pour l'usage visé par une norme (DTU), un Document Technique d'Application, un Avis Technique ou une Appréciation Technique Expérimentale. Il est notamment recommandé aux concepteurs de suivre les recommandations professionnelles RAGE relatives à l'Isolation Thermique par l'Intérieur (2015). Le parement BTC et l'isolant sont systématiquement séparés par une lame d'air (cf. A.5.2.3).

4. DESCRIPTION DE LA FABRICATION

Capacité moyenne prévue sur les trois premières années de production du site :

BTC et BTCS : 5000 t/an (environ 380 000 blocs/an) soit 11 500 m² de mur maçonné de 15 cm d'épaisseur

Mortier : 920 t/an

Ces BTC(S) sont produits sur le site de la Fabrique Cycle Terre : 2 bis rue Paul Langevin à Sevran (93270).

4.1. PRÉPARATION DE LA TERRE

4.1.1. SELECTION ET PREPARATION DE LA TERRE

La préparation de la terre (homogénéisation, criblage, séchage) est externalisée auprès du groupe ECT, partenaire Cycle Terre spécialisé dans la valorisation de terres inertes et autres déblais de chantiers. Une fois la terre sélectionnée, un stock sous forme de tas de l'ordre de 5000 t de terre est constitué.

La terre est sélectionnée conformément au processus décrit dans le Plan d'Assurance Qualité de la Fabrique Cycle Terre, c'est-à-dire :

- Etape 1 : Pré-sélection de chantier d'excavation sur la base d'une analyse des études géotechniques (G1 ou G2 AVP) et environnementales de préparation de chantier ;
- Etape 2 : Confirmation de la conformité de la terre excavée via la réalisation des essais suivants : granulométrie et sédimentométrie (selon protocole NF EN ISO17892-4), limites d'Atterberg et indice de plasticité (selon protocole NF EN ISO 17892-12). Si les essais précédents confirment l'intérêt de la terre, évaluation du retrait et de la cohésion sèche de la terre par essai Sandrammer (voir protocole en fiche P1 du CPU).
- Etape 3 : Confirmation de la conformité des produits obtenus par la réalisation des essais suivants :

Tableau 3 : Vérification des performances sur BTC et BTCS

Mesures	Protocole de mesure
Masse volumique apparente (MVA)	XP P 13-901
Résistance à la compression : En cas de validation, essai complémentaire :	NF EN 772-1 XP P13-901
Résistance à l'abrasion	XP P13-901
Essai de perte de masse en immersion (BTCS uniquement)	Voir fiche P3 du CPU

Tableau 4 : Vérification des performances sur mortier

Mesures	Protocole de mesure
Retrait linéaire	Voir fiche P4 du CPU
Résistance à la compression	NF EN 1015-11 : 2000
Résistance à la traction / flexion	NF EN 1015-11 : 2000
Adhérence mortier sur bloc	Voir fiche P5 du CPU

Tableau 5 : Vérification des performances sur enduit :

Mesures	Protocole de mesure
Résistance à l'abrasion	XP P13-901
Adhérence de l'enduit au support	Voir fiche P7 du CPU

Suite à la réalisation de ces essais et en cas de confirmation de la sélection de la terre, les rapports d'essai correspondants seront envoyés au CSTB.

La terre dédiée à la production de BTC(S) est séchée à l'air libre puis broyée à 10 mm, avant d'être à nouveau séchée sous couvert. La terre dédiée à la production de mortier est séchée à l'air libre puis broyée à 2 mm et mise en big bag.

A chaque étape de préparation (minimum 4), un tas de terre est produit par empilement de couches horizontales et repris ensuite par une exploitation frontale et sur toute l'épaisseur de la couche (ou sur une forte épaisseur) de façon à recouper la stratification des couches empilées et permettre ainsi une bonne homogénéisation du lot de terre.

La terre est transportée par camion de la zone de préparation à la Fabrique Cycle Terre, zone de production des matériaux.

4.1.2. STOCKAGE DES MATIERES PREMIERES

La terre homogénéisée et le sable sont stockés dans des boxs de stockage. Afin de conserver le taux d'humidité des terres livrées, les espaces de stockage sont couverts et leur sol empêche les remontées capillaires. Des murets délimitent les différents boxs de stockage et évitent la contamination des différents matériaux entre eux.

Les liants destinés à la fabrication des BTCS sont stockés en sac ou en big-bags sur palettes, sous abri, protégés de la pluie, des remontées d'humidité du sol par capillarité et des projections de boue.

4.2. PROCESSUS DE FABRICATION DES BTC

4.2.1. DOSAGE ET MALAXAGE DES MATIERES PREMIERES

Le mélange des matières premières se fait à l'aide d'une centrale de mélange de type « centrale à béton ». La terre et le sable sont transportés par un chargeur depuis les espaces de stockage. Ils sont chargés dans les 2 trémies alimentatrices doseuses de la centrale de mélange. Les trémies alimentent automatiquement le malaxeur planétaire de la centrale grâce à l'unité de commande de la centrale selon la formulation du mélange à produire. Le malaxeur est pourvu d'un système de pesée intégré, d'équipements de dosage et d'une unité de commande pilotée par logiciel. Pour les BTC stabilisés, le liant est dosé à l'aide d'une trémie crève-big bag et transporté par un convoyeur à vis directement dans le malaxeur. Le malaxeur mélange les matières à sec, puis les matières premières sont humidifiées dans le malaxeur. Un système de pulvérisation d'eau intégré au malaxeur permet une bonne répartition de l'eau pour assurer un mélange rapide et homogène. L'eau est dosée automatiquement grâce à l'unité de commande de la centrale et contrôlé par un capteur dans la cuve de malaxage. Un temps de malaxage minimum est défini dans le plan de Contrôle Qualité de la Fabrique pour permettre l'obtention d'un mélange homogène.

4.2.2. COMPRESSION

La compression des BTC se fait à l'aide d'une presse hydraulique à double compression verticale spécialement conçue pour la production de blocs de terre comprimée. La production se fait par campagnes de matériaux, la presse produisant alternativement des BTC stabilisés ou non stabilisés. Une trémie doseuse est alimentée en mélange prêt à l'emploi depuis le tapis cranté provenant de la centrale de mélange. Située au-dessus de la presse, elle dose automatiquement la matière nécessaire à une pression selon les données du poste de commande. Le séquençage entre la centrale en amont et la presse n'étant pas automatisé, ce sont les opérateurs de la presse et de la centrale qui surveillent le bon déroulement de l'alimentation en mélange de la trémie doseuse de la presse depuis la centrale.

Des moules interchangeables permettent de produire des blocs de différentes dimensions. Un à quatre BTC peuvent ainsi être produits à chaque action de compression.

4.2.3. PALETTISATION

La palettisation des blocs est assurée par un bras robotisé automatisé selon un calepinage adapté au type de bloc produit. Un convoyeur à rouleaux en sortie de presse convoie les blocs vers le robot implanté dans une zone de travail sécurisée.

4.2.4. CURE ET SECHAGE DES MATERIAUX PRODUITS

Séchage des BTC non stabilisés

En sortie de production, les palettes de BTC sont emmenées par chariot élévateur dans une zone couverte hors gel pour séchage pendant 1 semaine minimum. A la fin de ce délai, les palettes sont transportées en zone de stockage sous abri où elles sèchent durant 3 semaines minimum.

Cure humide des BTC stabilisés

Les BTC stabilisés doivent effectuer une cure en atmosphère humide durant environ 3 semaines pour éviter l'évaporation trop rapide de l'eau et favoriser une meilleure prise/hydratation des liants. Ceci permet d'obtenir les caractéristiques attendues du liant durci (résistance en compression, résistance au gel-dégel, durabilité, étanchéité, etc.).

Les palettes de BTC stabilisés sont filmées immédiatement après production pour permettre cette cure humide. Elles sont transportées, par chariot élévateur, dans une zone couverte hors gel pour une durée minimale de 7 jours. A la fin de ce délai, les palettes sont transportées par chariot élévateur en zone de stockage couverte extérieure où elles finiront leur séchage pendant 3 semaines minimum.

La campagne de vérification du bon déroulement de ces phases de cure et de séchage est décrite dans le CPU de la Fabrique.

4.2.5. CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Les palettes de BTC sont ensuite filmées avec des housses en plastique thermo-rétractables à l'aide de pistolets de rétraction gaz. Jusqu'à leur livraison, les palettes filmées sont stockées sur des racks extérieurs abrités.

Les blocs sont vendus :

- en palette Europe d'environ 1 tonne filmée, soit 116 blocs format classique
- à l'unité.

4.3. PROCESSUS DE FABRICATION DU MORTIER

Le mortier de pose pour BTC produit par Cycle Terre est produit en sac de 25 kg ou en big-bag d'1 t.

L'ajout d'un liant, si nécessaire, s'effectue sur le chantier suivant les proportions des recettes prescrites par Cycle terre (cf. guide de pose).

4.3.1. DOSAGE ET MELANGE DES MATIERES PREMIERES

Le mélange des matières premières se fait à l'aide de la centrale de mélange également utilisée pour la ligne BTC, de type « centrale à béton mobile ». La terre et le sable sont transportés par un chargeur depuis les espaces de stockage. Ils sont chargés dans les 2 trémies alimentatrices doseuses de la centrale de mélange. Les trémies alimentent automatiquement le malaxeur planétaire de la centrale grâce à l'unité de commande selon la formulation du mélange à produire. Le malaxeur est pourvu d'un système de pesée intégré, d'équipements de dosage et d'une unité de commande par ordinateur. Il mélange des matières sèches, soit à un taux d'humidité en masse inférieur à 4%.

Un temps de malaxage minimum est défini pour permettre l'obtention d'un mélange homogène.

4.3.2. CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Conditionnement en big-bags d'1 tonne

L'ensemble de la production de mortier est conditionné en big-bags à l'aide d'une station de remplissage à big-bags. Le mélange est déversé par un convoyeur à bande directement dans la trémie d'alimentation d'une station de remplissage de big-bags. Il passe au travers d'un tamis de sécurité vibrant afin de s'assurer de sa granulométrie < 2 mm. La station remplit l'équivalent d'un mélange de la centrale dans un big-bag, de l'ordre de 0,7 à 0,8 m³ (+/- 1 tonne).

Conditionnement en sacs de 25 kg

Environ 50 % des big-bags de mortier sont reconditionnés en sacs de 25 kg par un poste d'ensachage semi-automatique. Un big-bag de mortier est positionné sur le poste de vidange à big-bags installé au-dessus de l'ensacheuse. L'opérateur positionne un par un des sacs "à gueule ouverte" vides sur l'ensachoir et déclenche le remplissage. Un système de pesée automatique permet d'arrêter le remplissage du sac. Le sac plein est lâché sur un convoyeur qui l'évacue vers un conformateur automatique pour y être cousu. Un convoyeur à rouleaux achemine les sacs pleins vers le poste de palettisation.

Les palettes de 40 sacs de mortier, d'environ 1 tonne, sont filmées avec des housses plastique thermo-rétractables à l'aide de pistolets de rétraction gaz.

Les big-bags et palettes de sacs sont stockés sur des racks dans un espace couvert et protégé des remontées d'humidité jusqu'à leur livraison. Le mortier est vendu :

- en sacs de 25 kg, conditionnés en palettes de 40 sacs
- en sacs de 25 kg, à l'unité
- en vrac, conditionné en big-bag (environ 1 t)

4.4. CONDITIONS DE TRANSPORT DES PRODUITS

- Palettes de BTC avec housses thermo-rétractées
- Palettes de sacs de 25 kg de mortier avec housses thermo-rétractées
- Big-bags de mortier

4.5. CONTRÔLES

L'ensemble des étapes de la production est soumis à un Contrôle Qualité précis dont chacune des étapes est décrite dans le CPU de la Fabrique. Ce document rassemble les procédures de contrôle liées à la sélection des terres et à leur réception au centre de préparation, à leur préparation, à la réception des autres matières premières, à la production des BTC, à leur cure et à leur séchage, et à la production du mortier et des enduits.

5. DIMENSIONNEMENT ET CONCEPTION

5.1. PRINCIPES DE CONCEPTION

Caractéristiques mécaniques de la maçonnerie BTC

La maçonnerie de BTC résiste bien en compression, mais mal en traction, flexion et cisaillement, il faut éviter ce type de sollicitations et limiter les actions de poinçonnement.

Principe structurel

Les parements n'assurent pas de fonction structurelle (non porteurs, non contreventants). Des attaches assurent la stabilité du parement en liaison avec le mur support (à raison de 2 à 4 attaches / m², sauf points singuliers, cf. A.5.3.2).

Compatibilité du parement avec les déformations de la structure

Le type d'attaches à utiliser dépend des mouvements différentiels prévisibles entre le mur support et la maçonnerie de parement (cf. A.5.2.2).

La flèche active maximale de la poutre basse support de la maçonnerie est limitée à L/500.

Dans tous les cas, une désolidarisation de 10 mm minimum doit être prévue en tête ou en pied de parement (cf. A.5.3.3 et A.5.3.4).

Dans le cas où la flèche prévisible de la structure en tête de parement serait supérieure à 10 mm, le concepteur devra s'assurer que le jeu total est compatible avec les flèches de la structure (par exemple en augmentant en conséquence la dimension du vide en tête de parement ou de la bande de désolidarisation) (cf. A.5.3.4).

Variations dimensionnelles des matériaux

Le tassement vertical de la maçonnerie lors du séchage est de l'ordre de 3mm/m.

Dans le cas de charges non uniformes de la maçonnerie, des joints de tassement sont nécessaires (cf. A.5.3.6 et A.5.3.7).

Le retrait horizontal de la maçonnerie est de l'ordre de 0,6mm/m. Des joints de fractionnement sont donc à prévoir dans le cas de maçonnerie de longueur supérieure à 4,3m (cf. A.5.3.6).

Déformations du parement à long terme sous son poids propre

En considérant :

- un module d'Young instantané de 1000 MPa et un module d'Young à long terme de 400 MPa,
- et une masse linéaire du parement inférieure à 1800 kg/ml,

on estime la déformée long terme sous poids propre des hauteurs maximales de parement autorisées sans recoupement à 0,3 mm.

Sensibilité à l'humidité des BTC

Les caractéristiques mécaniques du BTC baissent sensiblement lorsque la teneur en eau du matériau augmente : résistances à la compression réduite, résistance à l'abrasion plus faible, variations dimensionnelles. Pour assurer la pérennité de la construction, la conception des bâtiments devra respecter impérativement les dispositions décrites dans ce document concernant :

- la protection contre les remontées capillaires (cf. A.5.3.3) ;
- l'entretien (cf. A.6.5).

Par ailleurs, l'aménagement d'une lame d'air est demandé entre le parement et le mur support (cf. A.5.2.3).

Résistance à l'abrasion et aux chocs durs de la maçonnerie

La partie courante de la maçonnerie est peu sollicitée à l'abrasion et peu sensibles aux chocs durs et ne nécessite donc pas de protections particulières dans la majeure partie des cas (cf. B.2.1). Il peut éventuellement être appliqué une finition de surface permettant de renforcer cette résistance sur tout ou partie de la maçonnerie (cf. A.6.4.2) ou une protection mécanique dans les zones où le risque d'abrasion ou de chocs durs est particulièrement élevé. Il est en particulier demandé de protéger les angles saillants se situant en zones de passage.

Les coefficients d'abrasion maximum suivants sont proposés aux concepteurs en fonction de l'exposition des parois :

- Dans les locaux privés¹³ : 0,5 g/cm² ;
- Dans les locaux accessibles au public :

¹³ Défini sur la base du classement proposé par la norme relative à la résistance aux chocs mous des cloisons (NF P18-301), c'est-à-dire en particulier dans les parties privatives de logements, bureaux, ou zones réservées au personnel des ERP.

- Zone de circulation forte et pour la maçonnerie située à une hauteur inférieure à 1,3m : 0,07 g/cm² (obtenue par utilisation de BTCS ou par traitement de surface de BTC) ou protection mécanique de la maçonnerie ;
- Zone de circulation moindre au vu de l'usage des locaux ou de l'aménagement de l'espace¹⁴ et pour la maçonnerie située à une hauteur inférieure à 1,3m : 0,2 g/cm² (obtenue par utilisation de BTC40 Cycle Terre ou par traitement de surface de BTC20) ;
- Partie de maçonnerie de hauteur supérieure à 1,3m : 0,5 g/cm²

¹⁴ Limitation de la circulation liée par exemple à la présence de mobilier type tables de restauration, de classe, comptoir ou banquette

5.2. DIMENSIONNEMENT

5.2.1. ÉPAISSEUR, ELANCEMENT ET LONGUEUR DE MAÇONNERIE

Épaisseur

Le parement en BTC aura une épaisseur comprise entre 9,5 et 15 cm.

Hauteur

Les hauteurs maximales des parements entre recoupement sont de :

- 4m pour une maçonnerie de 9,5 cm d'épaisseur ;
- 6m pour une maçonnerie de 15 cm d'épaisseur.

Longueur

La longueur des murs entre bords libres, joints de fractionnement ou angle de maçonnerie harpé, est limitée à 430 cm.

Ces dimensions maximales ont été déterminées par mesures des caractéristiques mécaniques de la maçonnerie et des attaches de liaison et calcul (cf. B.1.1.6). Les performances mécaniques de la maçonnerie sont très supérieures à ce que nécessite pour un usage en parement intérieur, et une baisse éventuelle des performances de la maçonnerie de l'ordre de 20% (due par exemple à une teneur en eau excessive des matériaux) ne remet pas en question ce dimensionnement.

5.2.2. LONGUEUR ET REPARTITION DES ATTACHES

La longueur d'attaches est à déterminer en fonction de la dimension de la cavité entre mur support et parement maçonné. Les différents modèles d'attaches proposés couvrent différents éventails de longueur (cf. A.3.3).

Le modèle d'attache doit aussi être déterminé en fonction des déformations prévisibles du mur support à l'ELS :

Tableau 6 : Déformations maximales admissibles pour le mur support en fonction du type d'attaches

Type d'attaches utilisées		SD28 de Ancon	SDV de Ancon ou LSA-L de Halfen
Déformations maximales admissibles pour le mur support	Verticales	35mm	10mm
	Horizontales dans le plan	H/300, dans la limite de 10mm	H/500, dans la limite de 5mm
	Horizontales hors plan	H/300	H/300

Avec H la hauteur de parement.

Dans le cas où d'autres références d'attaches seraient utilisées, la compatibilité entre les déformations maximales du mur support et le modèle d'attache devra être validée en concertation entre le BE Structure et le fabricant d'attaches.

Le nombre d'attaches en partie courante de maçonnerie est de :

Tableau 7 : Nombre d'attaches / m² en fonction du modèle et de l'humidité du local

	LSA-L de Halfen	SDV ou SD28 de Ancon
Local à faible hygrométrie (EA)	3	2
Local à hygrométrie moyenne ou forte (EB et EB+)	4	3

Dans le cas où les concepteurs souhaiteraient utiliser un autre modèle d'attache, des essais de résistance à la traction et à la compression devront être réalisés conformément à la NF EN 846-5 en association avec la maçonnerie Cycle Terre (contacter Cycle Terre). Le protocole de détermination du nombre d'attache /m² en fonction des résistances à la traction et à la compression mesurées est défini au paragraphe B.1.1.6.

Le nombre d'attaches est par ailleurs plus important aux niveaux des points singuliers (cf. A.5.3.2).

5.2.3. DIMENSIONNEMENT DE LA LAME D'AIR

L'épaisseur minimale de la lame d'air est fixée à 1cm.

Cette lame d'air peut être ventilée pour augmenter la surface d'échange entre l'air ambiant et la maçonnerie BTC et améliorer ainsi l'inertie et la régulation hygrométrique du local. Une ventilation de la lame d'air est toutefois défavorable du point de vue acoustique.

Une ventilation de la lame d'air n'est pas nécessaire pour maintenir des niveaux d'humidité faibles dans la maçonnerie BTC y compris en locaux humides (cf. B.2.7). Il est toutefois demandé par précaution de ventiler la lame d'air lorsque le parement se situe en local EB ou EB+P et lorsque le mur support du parement (le pare-vapeur le cas échéant) présente une valeur $S_d > 20$ m. Dans ce cas, l'épaisseur de la lame d'air doit être supérieure à 2cm et une surface de ventilation supérieure à 1500 mm²/ml¹⁵ répartie en pied et en tête de parement doit être ménagée via un lit de mortier ou des joints verticaux de première et dernière assise non garnis de mortier (1 par ml au minimum).

¹⁵ conformément au seuil minimum de ventilation des lames d'air défini dans le cadre de la RT 2012

5.3. DÉTAILS TECHNIQUES

5.3.1. APPAREILLAGE - CALEPINAGE

Calepinage

Le dessin du calepinage des maçonneries sera réalisé avant le lancement des travaux par l'entreprise en charge des documents d'exécution, maîtrise d'œuvre ou entreprise de construction selon les cas.

Afin d'identifier les problèmes de superposition des joints verticaux, il est conseillé de réaliser les plans :

- des deux premières assises ;
- des deux assises au-dessus du niveau des ouvertures ;
- des assises particulières.

Le calepinage permet de déterminer avec précision :

- la manière dont les blocs sont disposés (notamment pour prendre en compte les cas particuliers tels que les angles, les jonctions, les baies) ;
- les types de blocs nécessaires (entiers et fractions de blocs : $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$, etc.) ;
- le nombre de blocs de chaque type.

Recouvrement minimum

En dehors des joints de fractionnement, les joints alignés verticalement sont proscrits d'une assise sur l'autre. Le décalage des joints verticaux d'une assise à l'autre sera au minimum égal au $\frac{1}{4}$ de la longueur du bloc entier.

Des calepinages particuliers, permettant la réalisation de modénatures décoratives des blocs, restent possibles : il est en particulier permis de déroger à cette règle du recouvrement minimum entre bloc sur une hauteur maximum de 3 assises de bloc consécutives.

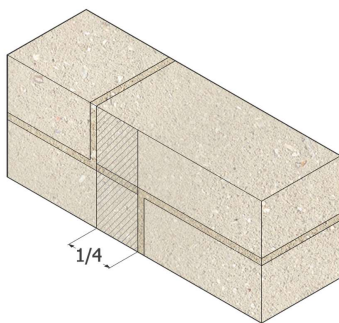


Fig. 7 : Recouvrement minimum des BTC sur deux assises successives

Appareillage

Les BTC de format classique peuvent être appareillés en panneresse (maçonnerie de 15 cm d'épaisseur) ou sur chant (maçonnerie de 9,5 cm d'épaisseur).

Les BTC de format parement peuvent être appareillés en panneresse (maçonnerie de 9,5 cm d'épaisseur).

Angles maçonnerés

Les angles entre pans de maçonnerie peuvent être réalisés par harpage des assises successives dans le cas où les déformations prévisibles des maçonneries de part et d'autres de l'angle sont similaires (en particulier le tassement de la maçonnerie, lié à sa hauteur et au rythme de pose).

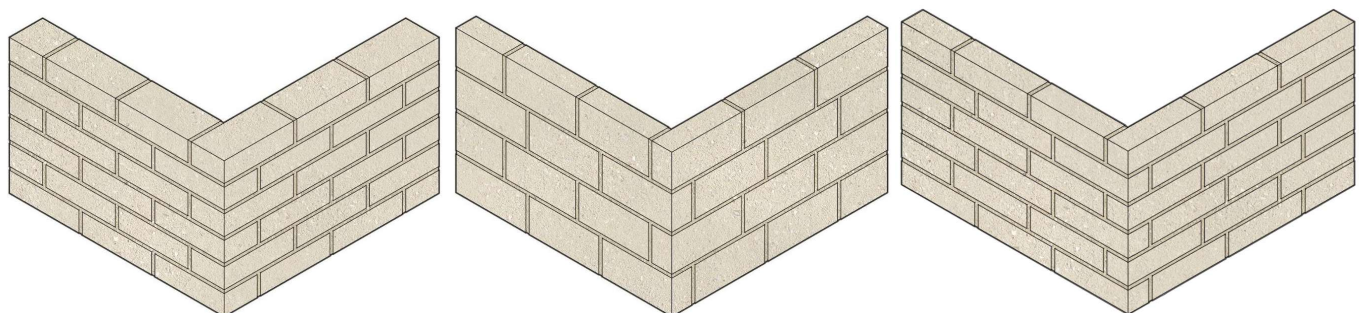


Fig. 8 : Principe d'appareillage des angles (BTC format classique en panneresse, sur chant, BTC format parement)

5.3.2. ATTACHES DE LIAISON ENTRE PAREMENT BTC ET MUR SUPPORT

La stabilité du parement doit être assurée par des liaisons à la paroi porteuse à l'aide des attaches décrites au paragraphe A.3.3. Les attaches sont fixées au gros œuvre une fois le mur support réalisé conformément aux prescriptions du fabricant. En particulier, dans le cas d'une paroi porteuse à ossature bois, ces attaches doivent être fixées dans les poteaux d'ossature. Elles sont scellées au fur et à mesure du montage du parement dans le mortier des joints horizontaux. Leur extrémité se situe à une distance de la face visible du parement de :

Tableau 8 : Positionnement des attaches au sein du lit de mortier

Modèle d'attaches	Maçonnerie de 95mm	Maçonnerie de 150mm
LSA-L de Halfen	40mm	75mm
SD / P de Ancon	30mm	75mm

Le nombre minimum d'attaches disposées entre le parement et le mur support en partie courante est défini au paragraphe A.5.2.2. Ces attaches doivent être réparties uniformément sur la surface, en tenant compte des dimensions des panneaux isolants le cas échéant.

Le nombre d'attaches doit être plus important proche des endroits sensibles : ouvertures, angles, bords verticaux libres, tête de mur de parement dans le cas où elle n'est pas en contact avec le plancher haut (cf A.5.3.4). Dans ces différentes zones, il est mis en œuvre une attache tous les deux lits de BTC (verticalement) et d'une attache un BTC sur deux (horizontalement). Ces attaches doivent être à une distance du bord de la maçonnerie comprise entre 5 et 20cm.

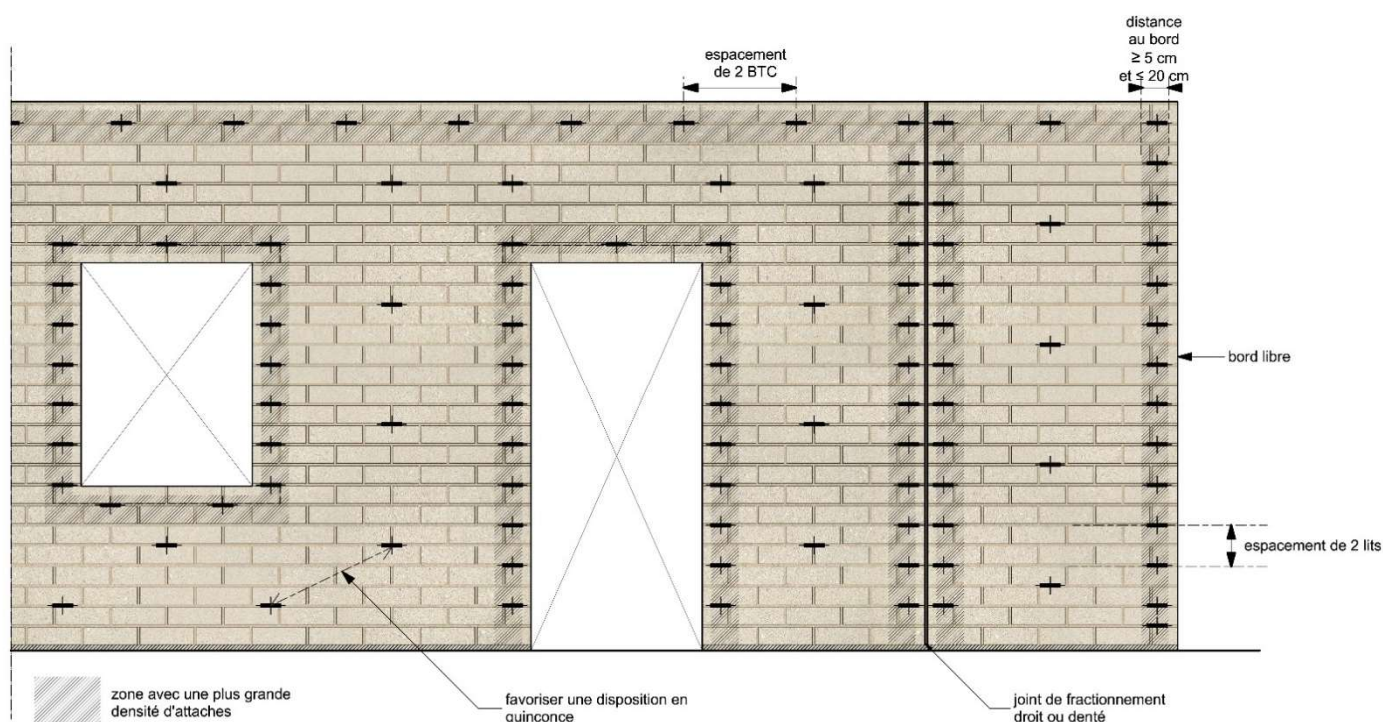


Fig. 9 : Nombre d'attaches proche des endroits sensibles

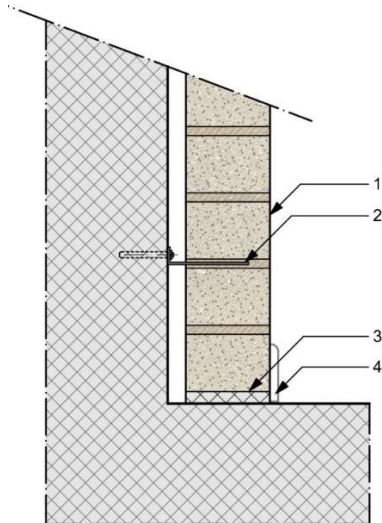
5.3.3. JONCTION AVEC LE SOL / SUPPORT

On rappelle que la flèche active du support du parement est limitée à $L/500$.

Lorsqu'aucune désolidarisation (espace vide ou bande de désolidarisation) n'est prévue en tête de parement, alors une bande de désolidarisation doit être fixée sur le sol avant le montage du parement. Cette bande doit être conforme au DTU 20.1 et en particulier avoir la même largeur que le parement maçonné. Son épaisseur minimum est alors de 10 mm. Cette épaisseur peut être réduite à 5 mm si une autre bande d'épaisseur 5 mm est prévue en tête de parement.

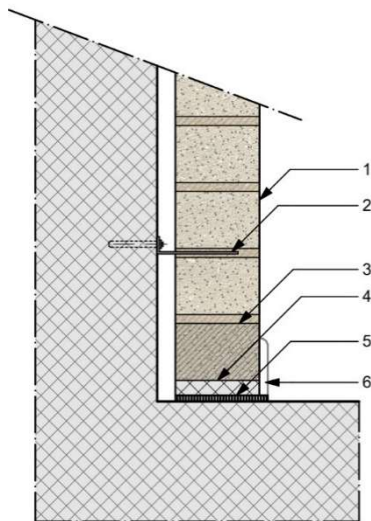
Un premier lit de 2 cm de mortier à base de liant hydraulique (dosé à 600kg/m³ de ciment) est demandé dans le cas où le parement repose au niveau du sol fini. Un mortier terre peut être utilisé pour ce premier lit dans le cas où le parement repose sur un élément de soubassement insensible à l'eau de plus de 2 cm de haut par rapport au niveau du sol fini. Celui-ci sera préférentiellement réalisé par un relevé béton. Des dispositions de maçonneries de petits éléments telles que briques cuites, blocs béton, pierres ou une lisse basse (en bois de classe 3 ou supérieure doublées d'une membrane étanche) sont également possibles dès lors qu'elles présentent une rupture de capillarité équivalente.

Un premier lit de maçonnerie en BTCS peut être mis en œuvre lorsqu'une protection renforcée à l'humidité est recherchée. C'est en particulier nécessaire en cas de chape flottante. Une remontée d'étanchéité devra alors être mise en place, de 2 cm au-dessus du sol fini au minimum.



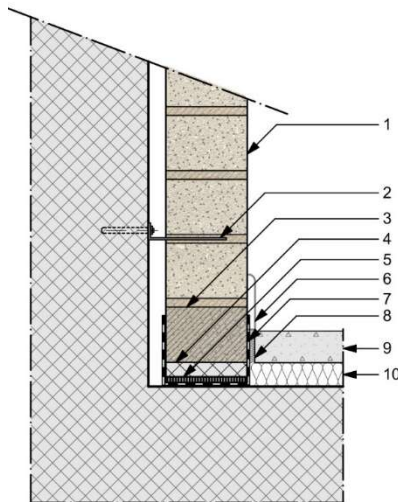
1. BTC
2. Attache métallique
3. Mortier à base de liant hydraulique (600 kg/m³ de ciment)
4. Plinthe éventuelle

Fig. 10 : Détail en coupe de la jonction sur sol fini



1. BTC
2. Attache métallique
3. Eventuelle BTCS
4. Mortier à base de liant hydraulique (600 kg/m³ de ciment)
5. Bande de désolidarisation (épaisseur 5 mm ou 10 mm selon les cas)
6. Plinthe éventuelle

Fig. 11 : Détail en coupe de la jonction sur sol fini (avec bande de désolidarisation)



1. BTC
2. Attache métallique
3. BTCS
4. Mortier à base de liant hydraulique (600 kg/m³ de ciment)
5. Eventuelle bande de désolidarisation (épaisseur 5 mm ou 10 mm selon les cas)
6. Plinthe
7. Film d'étanchéité dépassant au minimum de 2 cm au-dessus du sol fini
8. Bande de désolidarisation
9. Chape flottante
10. Isolant acoustique

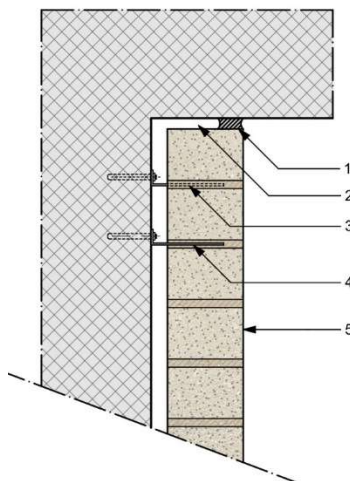
Fig. 12 : Détail en coupe de la jonction avec chape flottante

5.3.4. JONCTION AVEC LE PLANCHER HAUT

La liaison entre la maçonnerie et le plancher haut peut être réalisée :

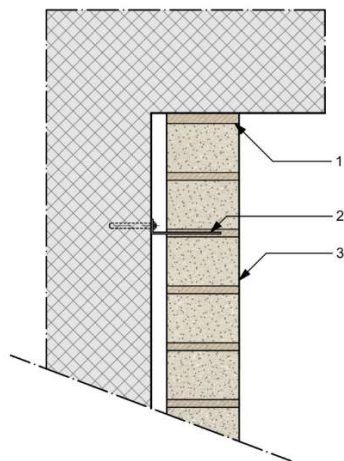
- soit par un espace laissé vide ou comblé localement par du mastic. Dans ce cas, un nombre d'attaches plus important doit être prévu en tête de mur (cf. A.5.3.2) ;
- soit avec un bourrage au mortier de pose seul (cas d'une seule bande de désolidarisation en pied de parement). Dans ce cas, la paroi est considérée comme tenue en tête, il n'est pas nécessaire d'augmenter le nombre d'attaches en tête ;
- soit par une bande de désolidarisation insérée en tête de parement entre le dernier lit de mortier et le plancher haut. Dans ce cas, la paroi est considérée comme tenue en tête, il n'est pas nécessaire d'augmenter le nombre d'attaches en tête.

Dans le cas où la flèche prévisible de la structure en tête de parement serait supérieure à 10 mm, le concepteur devra s'assurer que le jeu total est compatible avec les flèches de la structure.



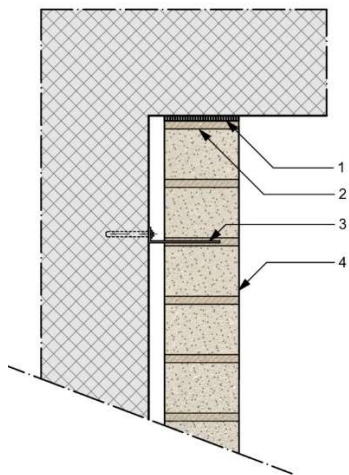
1. Mastic
2. Vide
3. Attache métallique de renforcement de la tête de parement
4. Attache métallique disposée en quinconce avec attache 3
5. Maçonnerie de parement en BTC

Fig. 13 : Détail en coupe de la jonction avec espace vide en tête de parement



1. Mortier terre
2. Attache métallique
3. Maçonnerie de parement en BTC

Fig. 14 : Détail en coupe de la jonction avec mortier en tête de parement

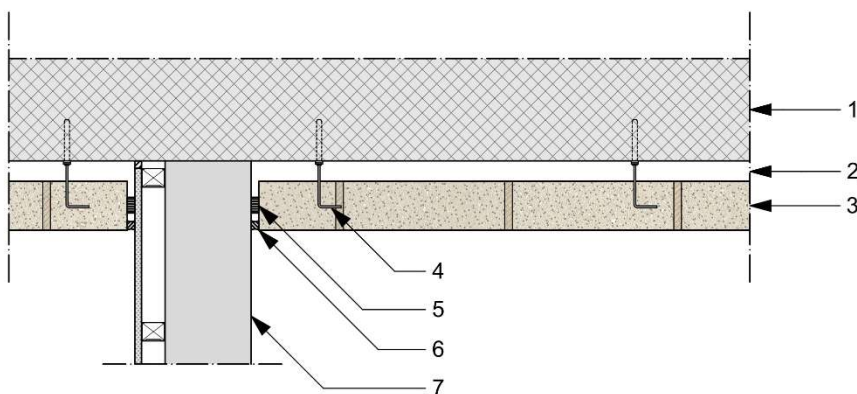


1. Bande de désolidarisation
2. Mortier terre
3. Attache métallique
4. Maçonnerie de parement en BTC

Fig. 15 : Détail en coupe de la jonction avec une bande de désolidarisation en tête de parement

5.3.5. JONCTION AVEC LES AUTRES PAROIS VERTICALES

Les bords de la maçonnerie doivent être désolidarisés des parois verticales adjacentes lorsqu'elles sont constituées d'un autre matériau que la maçonnerie BTC (cf. A.5.3.1).



1. Mur support
2. Lame d'air
3. Maçonnerie BTC
4. Attache métallique
5. Eventuelle bande pré-comprimée
6. Eventuel cordon de mastic
7. Mur de refends

Fig. 16 : Exemple de jonction désolidarisée avec une paroi verticale perpendiculaire

5.3.6. FRACTIONNEMENT DES MURS PAR DES JOINTS DE TASSEMENT, RETRAIT OU DE DILATATION

Si des joints de retrait / dilatation sont prévus dans le mur support ou dans le soubassement, ils doivent impérativement être prolongés verticalement dans la partie maçonnée en BTC.

Le mouvement prévisible de la maçonnerie BTC lié au changement d'humidité ou de température des matériaux est de l'ordre de

0,6 mm/m. La limitation à 430 cm de la longueur d'un mur en BTC d'épaisseur inférieure ou égale à 15cm sert à prévenir les risques de fissuration des ouvrages liés à ces mouvements.

Ce joint peut être rectiligne ou denté pour suivre le décalage des briques d'un rang à l'autre. Le joint de retrait peut être calfeutré par un mastic adapté¹⁶. Il peut être fait usage de mastics de calfeutrement et complément d'étanchéité adaptés aux supports de type mortier de maçonnerie conventionnelle.

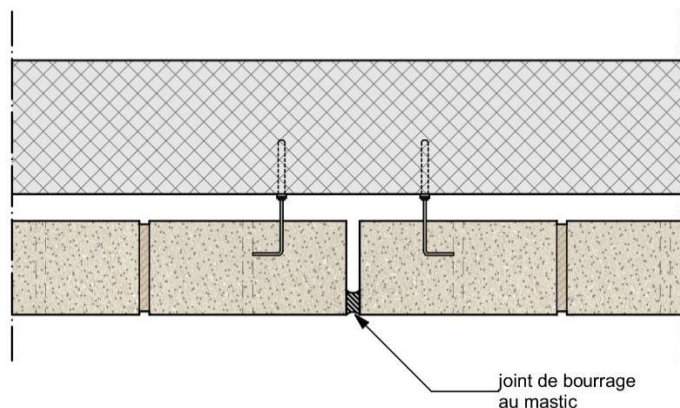


Fig. 17 : Exemple de traitement du joint de fractionnement

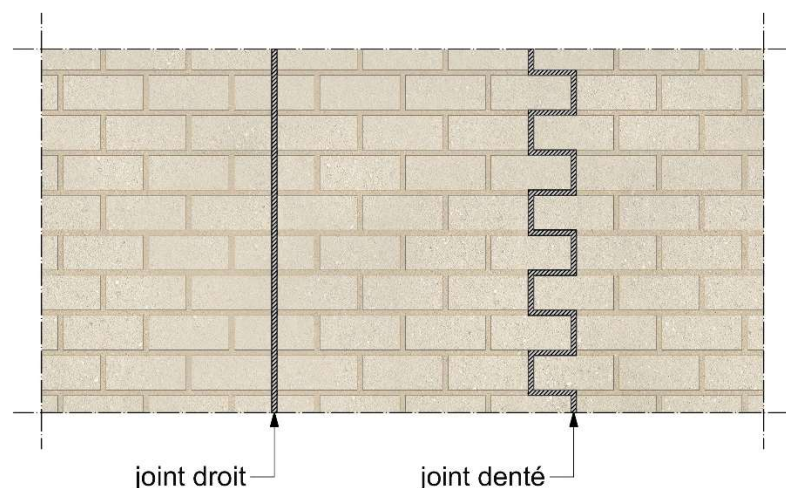


Fig. 18 : Joint de fractionnement droit ou denté

5.3.7. JONCTION AVEC LES HUISSERIES

Jonction allège-trumeau

Deux cas sont possibles :

- Soit l'appui de baie se prolonge de part et d'autre de la baie d'au moins 20 cm. Dans ce cas, la jonction peut être réalisée par harpage.
- Soit l'appui de baie ne se prolonge pas. Afin d'éviter le cisaillement de l'allège, la solution de joints de tassement entre l'allège et le mur devra alors être choisie. Le joint de tassement sera traité de la même manière que le joint de dilatation (cf. A.5.3.6). Ce joint peut en particulier être prolongé sur toute la hauteur du mur en cas de linteau assuré par une console.

Linteau

Les linteaux peuvent être réalisés en béton préfabriqué, en acier, ou en bois. Dans ce cas, la longueur d'appui ne peut être

¹⁶ Les matériaux pour joints de type mastic sont définis par la norme NF EN 26927

Les matériaux pour joints en caoutchouc, sont définis par la norme NF EN 12365 partie 1 à 4

Les matériaux pour joints de type élastomère, plastique ou mastic préformés sont définis par la norme NF P 85-304

Les matériaux pour en mousses imprégnées sont définis par la norme NF P 85-570

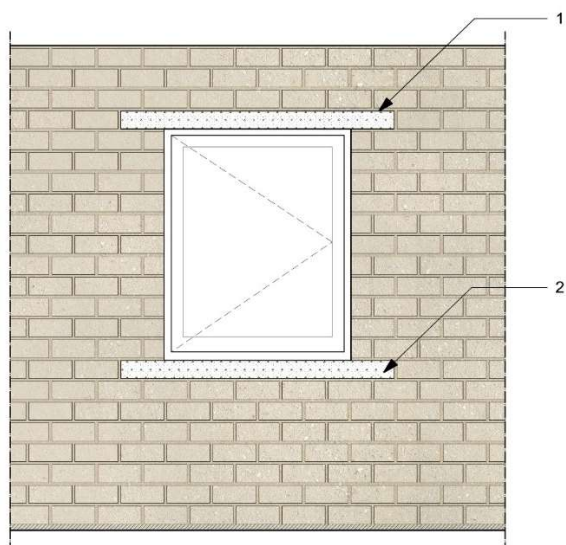
inférieure à 20 cm, et la flèche maximum du linteau est limitée à $1/500^{\text{e}}$ de sa portée.

Le linteau peut aussi être réalisé par console de supportage métallique. Dans ce cas, des mesures doivent être prises pour éviter l'apparition de fissures au niveau des angles supérieurs de l'huissierie, par exemple : joints de fractionnement, insertion de renforcement métallique type Murfor de Plaka ou équivalent dans la maçonnerie située au-dessus de la console.

Scellements et fixations des menuiseries

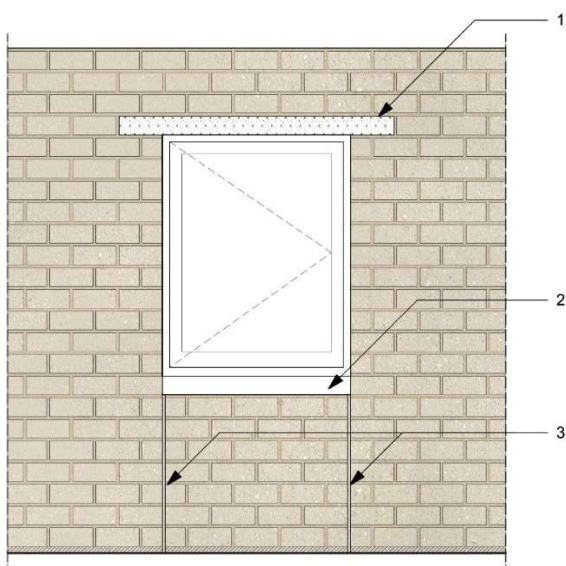
La fixation des menuiseries directement dans les blocs BTC n'est pas couverte par le présent document. On réalisera l'ancrage des cadres dormants des menuiseries dans le mur support, de façon à ce que les efforts de vent ne soit pas repris par le parement BTC.

Des exemples d'insertion sont présentés en figures 22 à 29.



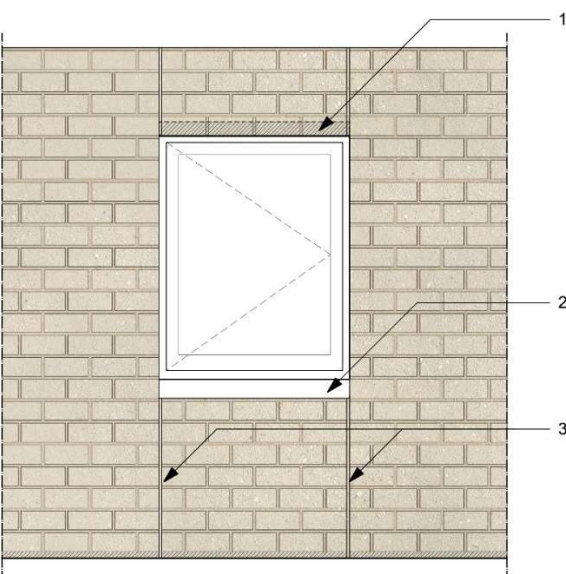
1. Linteau avec longueur d'appui de minimum 20cm de part et d'autre de l'ouverture
2. Appui avec prolongation de la longueur d'appui de minimum 20cm de part et d'autre de l'ouverture

Fig. 19 : Insertion de baies avec prolongation des appuis et linteaux



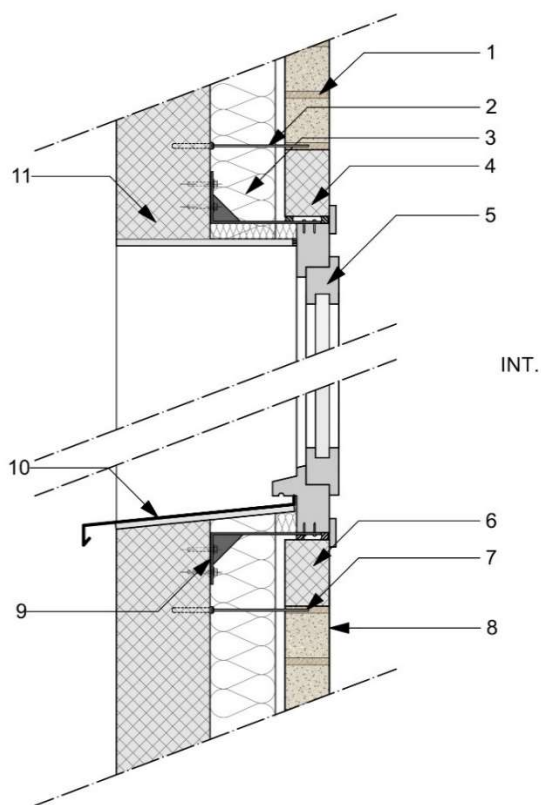
1. Linteau avec longueur d'appui de minimum 20cm de part et d'autre de l'ouverture
2. Appui sans prolongation de la longueur d'appui
3. Joints de fractionnement

Fig. 20 : Insertion de baies avec prolongation du linteau et joints de fractionnement



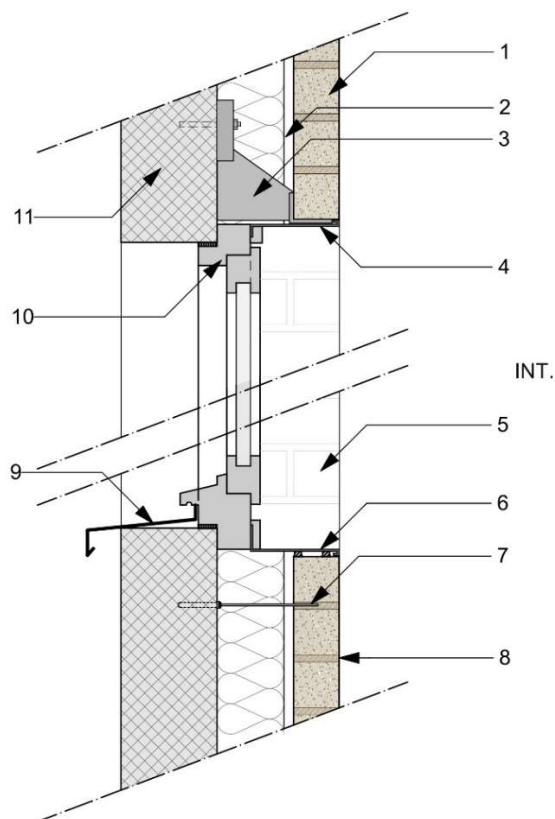
1. Linteau type console
2. Appui sans prolongation de la longueur d'appui
3. Joints de fractionnement

Fig. 21 : Insertion de baies avec joints de fractionnement toute hauteur



1. Parement BTC
2. Attache de liaison métallique
3. Isolation + lame d'air
4. Linteau béton ou bois + mastic souple en sous face et couvre joint
5. Menuiserie au nu intérieur du parement, liée au mur support par des équerres de fixation
6. Appui béton ou bois + mastic souple et couvre joint
7. Attache de liaison métallique
8. Allège BTC
9. Equerre de fixation de la menuiserie
10. Bavette métallique de traitement de l'appui de baie
11. Mur support

Fig. 22 : Exemple d'un mur avec ITI – linteau et allège prolongés dans le parement – menuiserie au nu intérieur du parement (avec fixation dans le mur support par équerre)



1. Parement BTC
2. Isolation + lame d'air
3. Console de supportage du linteau
4. Tôle pliée d'habillage du linteau
5. Jambage en parement BTC
6. Tôle pliée d'habillage de l'appui+ mastic souple
7. Attache de liaison métallique
8. Allège BTC indépendante
9. Bavette métallique de traitement de l'appui de baie
10. Menuiserie en applique sur le mur support
11. Mur support

Fig. 23 : Exemple d'un mur avec ITI – linteau et allège qui ne se prolongent pas dans le parement – menuiserie en applique sur le mur support

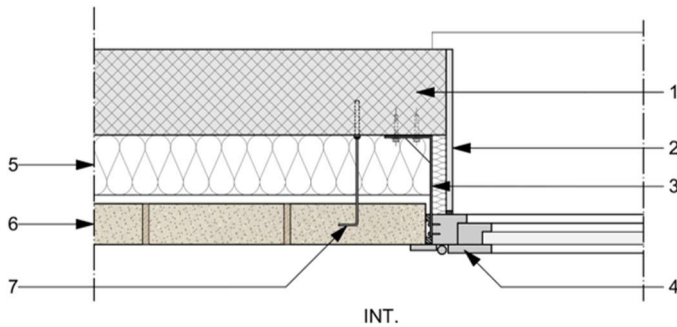


Fig. 24 : Exemple 1 d'intégration avec menuiserie au nu intérieur du parement (avec fixation dans le mur support par équerre)

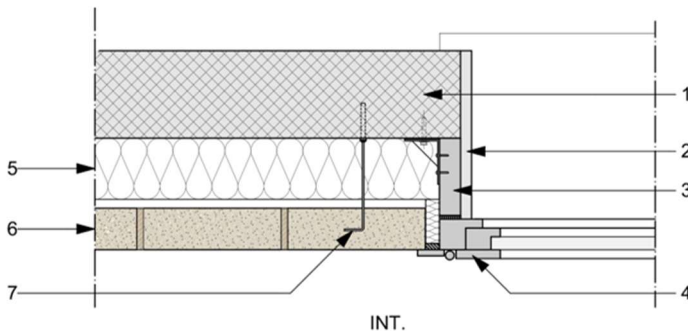


Fig. 25 : Exemple 2 d'intégration avec menuiserie au nu intérieur du parement (avec fixation dans le mur support par tapée de fixation)

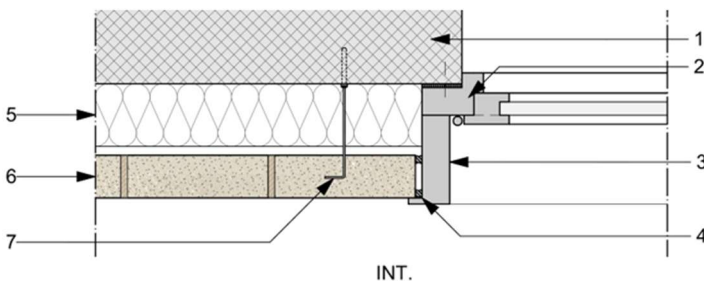


Fig. 26 : Exemple d'intégration avec menuiserie en applique sur le mur support

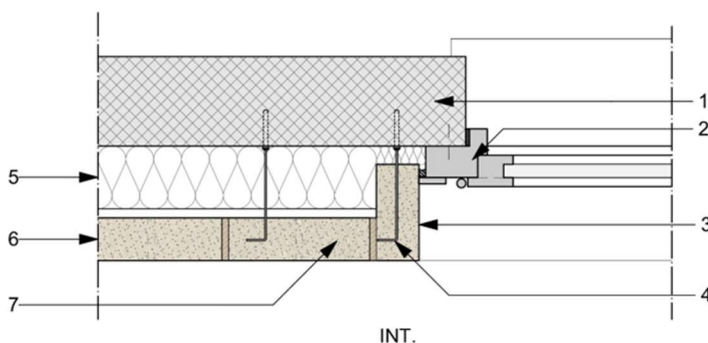
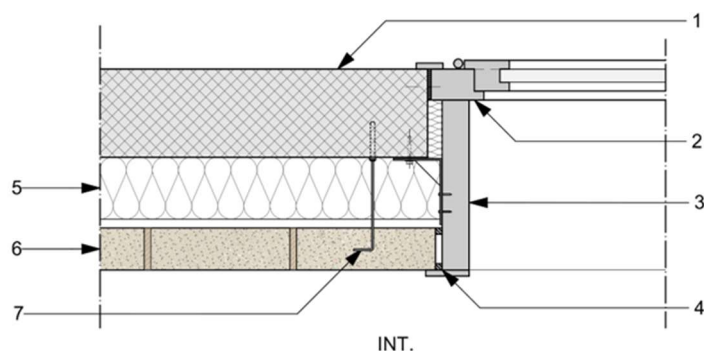
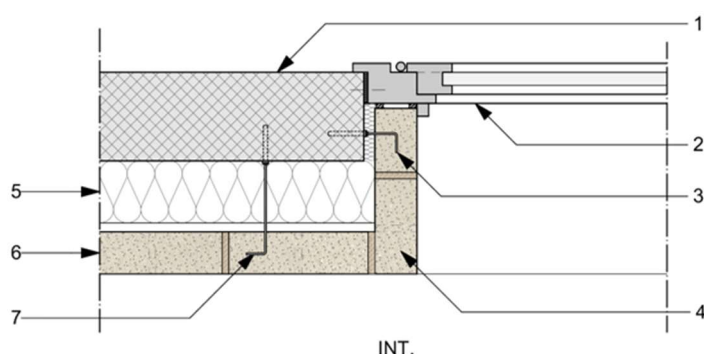


Fig. 27 : Exemple d'intégration avec menuiserie en applique sur le mur support et jambage de tableau en parement BTC



1. **Mur support**
2. **Menuiserie en tunnel sur mur support**
3. **Habillage du tableau + équerre de fixation au mur support**
4. **Mastic souple + couvre joint**
5. **Lame d'air + isolation**
6. **Parement BTC**
7. **Attache de liaison métallique**

Fig. 28 : Exemple d'intégration avec menuiserie au nu extérieur du mur support



1. **Mur support**
2. **Menuiserie en tunnel sur mur support**
3. **Attache de liaison métallique**
4. **Retour de tableau en BTC avec angle harpé**
5. **Lame d'air + isolation**
6. **Parement BTC**
7. **Attache de liaison métallique**

Fig. 29 : Exemple d'intégration avec menuiserie au nu extérieur du mur support et jambage du tableau en parement BTC

5.3.8. PASSAGE DES RESEAUX

Passage des réseaux et incorporations

Le parement BTC étant destiné à rester apparents, il est préférable (pour des raisons esthétiques) d'éviter les saignées au profit d'autres types de passages, en particulier en utilisant la lame d'air située entre le parement et le mur support.

Dans tous les cas, le passage par saignée et encastrement devra respecter la norme NF C15-100 et le mémento du NF DTU 20.13 P3 pour les canalisations électriques.

Fixation boîte électrique

Il est possible d'intégrer aux parois BTC des boîtes d'encastrement électrique pour des équipements de type interrupteur ou prise de courant. Cependant, pour une meilleure finition, on pourra chercher autant que possible à positionner ces équipements ailleurs que dans les murs BTC, par exemple :

- dans les soubassements béton lorsque cela est possible,
- dans les précadres de menuiserie,
- dans des parois d'une autre nature.

Lorsque ces dispositions ne sont pas possibles, le scellement de boîtes électriques se fait au plâtre classique en fond de trou. Le garnissage de finition sera quant à lui réalisé avec le mortier à BTC.

Réseaux de plomberie

L'incorporation des réseaux de plomberie (eaux) au sein du mur est proscrite. Seules les traversées ponctuelles sont permises. Les risques de pathologies dues à l'humidité peuvent avoir de graves conséquences. Tout raccord à l'intérieur du mur est proscrit, les traversées seront équipées d'un fourreau étanche sans rupture.

Réservation en traversé de parement

Des réservations au travers du parement, par exemple pour le passage des réseaux, d'une taille maximale de 200 cm² sont permises, sans mise en place de raidisseurs, de linteaux ou d'un cadre support particulier. La largeur du passage sera à adapter au format des blocs en évitant, dans la mesure du possible, d'être supérieur à 10 cm.

Les passages de câbles et tuyaux unitaires d'un diamètre maximal de 100 mm peuvent être calfeutrés au mortier.

5.3.9. FIXATION DE CHARGES NON STRUCTURELLES

Aucune fixation par clouage ou par pistoscellement ne pourra être réalisée dans la maçonnerie.

Quel que soit le type de fixation, une distance minimale aux bords de la maçonnerie (y compris angles saillants) supérieure à la profondeur d'ancrage devra être respectée.

Si le sens de la fixation est parallèle au matériau, dans l'axe du plan du mur, la fixation s'effectuera dans le tiers central du mur et la distance au bord peut être réduite.

Une distance minimale entre fixations devra respecter un entraxe minimum de 2 fois la profondeur d'ancrage.

La fixation d'objets de masse inférieure à 30 kg est autorisée avec des chevilles expansives plastiques ou des chevilles à expansion en caoutchouc.

La fixation d'objets de masse comprise entre 30 et 100 kg est autorisée soit avec des vis HUS3 de Hilti ou équivalent, soit avec des tiges filetées HIT-V avec scellement chimique par résine HY 170 de Hilti ou équivalent, à raison de 4 vis ou tiges minimum.

La fixation d'éléments structurels n'est pas autorisée dans la maçonnerie.

5.3.10. PIECES HUMIDES

La ventilation des locaux chauffés devra garantir que le taux d'humidité relative moyen journalier prévisible ne dépasse pas 80% pendant plus de sept jours d'affilée¹⁷.

Locaux moyennement humides¹⁸ (EB)

Le parement maçonné est autorisé en local EB uniquement sur les parois non exposées à des projections d'eau régulières de type ruissellement et sous réserve :

- d'utiliser des BTC de type Rc4 (cf. A.3.1.1) pour la réalisation du parement ;
- d'augmenter d'une unité le nombre d'attaches en partie courante (cf. B.1.1.6).

Dans le cas où le parement débute au niveau du sol fini, alors le premier lit de mortier est dosé à 600 kg/m³ de ciment et la première assise sera réalisée en BTCS (de classe d'application CL2 au sens de la norme XP P 13-901). Cette disposition n'est pas obligatoire si la maçonnerie BTC repose sur un soubassement insensible à l'eau de plus de 10 cm. Celui-ci sera préférentiellement réalisé par un relevé béton, des dispositions de maçonneries de petits éléments telles que briques cuites, blocs béton, pierres sont également possible dès lors qu'elles présentent une rupture de capillarité équivalente.

Locaux humides (EB+P)

Le parement maçonné est autorisé en local EB+P uniquement sur les parois non exposées à des projections d'eau régulières de type ruissellement et sous réserve :

- d'utiliser des BTCS et du mortier stabilisé pour la réalisation du parement ;
- d'augmenter d'une unité le nombre d'attaches en partie courante (cf. B.1.1.6).

Dans le cas où le parement débute au niveau du sol fini, alors le premier lit de mortier est dosé à 600 kg/m³ de ciment. De plus, la première assise sera réalisée en BTCS (de classe d'application CL2 au sens de la norme XP P 13-901). Cette disposition n'est pas obligatoire si la maçonnerie BTC repose sur un soubassement réalisé par un relevé béton de plus de 10 cm. Celui-ci sera préférentiellement réalisé par un relevé béton, des dispositions de maçonneries de petits éléments telles que briques cuites, blocs béton, pierres sont également possible dès lors qu'elles présentent une rupture de capillarité équivalente.

¹⁷ Limiter la durée d'exposition à 80% d'humidité relative permet de limiter le risque que la maçonnerie atteigne sa teneur en eau d'équilibre dans ces conditions (estimée à moins de 3%) (cf. B.1 et B.2.6).

¹⁸ Dans le cadre de l'annexe D du DTU 31.4, cette catégorie inclue les salles d'eau privatives des bâtiments d'habitation.

6. MISE EN ŒUVRE

6.1. PRÉPARATION DU CHANTIER ET CONDITIONS DE MISE EN ŒUVRE

6.1.1. PREPARATION DU CHANTIER

Conditions préalables

Les travaux ne doivent être entrepris que dans des constructions accessibles, hors d'eau, dont l'état d'avancement met les ouvrages en BTC à l'abri des intempéries et notamment du risque d'humidification par apport accidentel d'eau liquide.

Réception des supports

L'entreprise en charge de la pose des BTC devra réceptionner les supports et s'assurer qu'il n'existe pas d'erreur d'implantation ou de tolérance dimensionnelle sur les structures associées.

Les supports sont réceptionnés conformément aux spécifications des normes DTU les concernant (aspect de surface, planéité, aplomb, alignement, etc.).

Le montage de la maçonnerie ne doit être entrepris que si les huisseries mises en place sont compatibles avec la maçonnerie à exécuter, convenablement implantées et réglées et munies, si nécessaires, des entretoises provisoires nécessaires pour éviter des déformations des montants sous l'effet des poussées éventuelles de la maçonnerie. Ces entretoises doivent être maintenues en place jusqu'à l'achèvement de la maçonnerie.

Réception des matériaux

LOTS DE BTC

Lors de la livraison, la réception est assurée par un responsable désigné de l'entreprise de pose des produits. Celui-ci s'assure de la conformité des blocs livrés par vérification de la fiche produit.

Il devra également s'assurer de l'état des lots livrés : endommagements accidentels, humidité en excès, souillures, etc. Le contrôle sera mené par une inspection visuelle. En cas de non convenance des lots de BTC, la livraison pourra être refusée.

Afin d'assurer une homogénéité des nuances de blocs, la commande des matériaux par l'entreprise sera réalisée en une seule fois. Malgré cela, de légères variations de teintes restent possibles. Afin d'éviter un défaut d'homogénéité dans le cas d'une maçonnerie apparente, il est recommandé de panacher, lors de la mise en œuvre, les blocs issus des différents lots de BTC.

MORTIERS

Les mortiers sont livrés sur chantier soit en big-bags, soit en sacs de 25 kg. Le responsable doit s'assurer de la conformité des produits livrés par vérification de la fiche produit. Les contrôles effectués sont visuels, à partir d'un échantillon prélevé lors de chaque livraison : conformité aux spécifications techniques.

LIANTS

La livraison se fait en sacs sur site. Le contrôle à la livraison permettra de vérifier que :

- Les produits livrés sont sains, non altérés (humidité) et sans défaut, conformes aux normes et en cohérence avec les spécifications techniques de l'opération.
- La validité des dates limites d'utilisation prescrites par le fabricant sont respectées.

Stockage des matériaux sur chantier

Il convient de protéger les matériaux de la pluie et de l'humidité pendant toutes les phases de manutention et de stockage précédant la pose.

Il est préférable de stocker les BTC sur palettes à l'abri de la pluie et de retirer les films de conditionnement des palettes quelques jours avant la pose afin de permettre le séchage de la condensation éventuelle pouvant apparaître sous celui-ci. De plus, les BTC sont sensibles aux chocs, il est préférable de les stocker en dehors des zones de passage des engins de chantier.

Il convient d'éviter tout mélange entre des matériaux de natures différentes et la pollution des matériaux entre eux ou par le sol du site ou des déchets. Si plusieurs types de liants sont nécessaires au chantier, leur stockage sera séparé pour éviter des erreurs et mélanges.

Validation d'aspect et mur prototype

Dans le cas de maçonneries BTC apparentes, la validation de la qualité de finition des parements (calepinage, couleur, jointoiement et finition) peut s'effectuer par la réalisation, en début de chantier, d'un ou plusieurs murs prototypes permettant de définir le résultat recherché et ces critères d'acceptation.

Les prototypes sont effectués avec les matériaux et la mise en œuvre propre au marché projeté et avec une géométrie définie par la maîtrise d'œuvre. Les prototypes sont réalisés sur chantier et conservés durant la durée de celui-ci. Le contrôle d'aspect durant le chantier et l'acceptation à réception se feront par comparaison avec les murs prototypes et suivant les tolérances définies au préalable.

6.1.2. CONDITIONS DE MISE EN ŒUVRE

Conditions climatiques

Il faut être vigilant aux conditions climatiques lors de la mise en œuvre, particulièrement en cas de temps froid ou de temps chaud et venteux.

Si la température est durablement inférieure à 0°C, il est proscrit de continuer la réalisation des ouvrages.

En cas de temps chauds, dès lors que la température est durablement supérieure à 30°C¹⁹, il est préférable de préparer des petites quantités de mortier utilisables en moins de 30 minutes²⁰. Une dessiccation trop rapide de la maçonnerie peut entraîner l'apparition de fissures dues à un retrait important. Quelques précautions simples peuvent également être prises : maçonner aux heures les moins chaudes, protéger le mortier et les maçonneries de la dessiccation (arrosage léger en cas de maçonnerie stabilisée, mise en place d'une protection par bâche ou géotextile, etc.).

Protection contre les dommages mécaniques

Le montage de la maçonnerie doit être exécuté de sorte que la stabilité soit garantie en cours de construction. Durant le chantier et jusqu'au repli de celui-ci, il faut protéger les surfaces des murs et spécialement les angles saillants des chocs qui pourraient les endommager. Ces dommages sont le plus souvent dus à la manutention d'éléments lourds durant le chantier (coffrages, échafaudages, outils divers) ou aux manœuvres d'engins et véhicules évoluant sur le site.

Sécurité des intervenants

Les mesures de sécurité à prendre sont identiques à celles concernant la réalisation d'un ouvrage en maçonnerie classique de petits éléments. Il n'existe pas de conditions spécifiques de sécurité liées à la mise en œuvre de murs en BTC. Suivant l'importance des ouvrages à réaliser, les dispositions de sécurité peuvent être détaillées dans un Plan Particulier de Sécurité et de Protection de la Santé (PPSPS) permettant d'assurer la sécurité des intervenants pendant toute la durée du chantier.

6.2. PRÉPARATIONS POUR LA MAÇONNERIE BTC

6.2.1. INTERFACES

Avant la pose des BTC, mettre en place l'éventuelle bande de désolidarisation au sol sur toute la largeur de la cloison finie (y compris les enduits et les plinthes).

6.2.2. GACHAGE ET UTILISATION DES MORTIERS

Le mélange des granulats et de l'éventuel liant doit se faire à sec avant l'ajout de l'eau pour éviter des défauts d'homogénéité (cf. guide de pose).

6.3. POSE DES BTC

Un guide dédié à la pose de la maçonnerie BTC est publié par Cycle Terre pour accompagner les maçons. Les principaux éléments sont repris ci-dessous, le concepteur pourra se référer au guide de pose pour plus de détails et illustrations.

¹⁹ De manière générale, les liants (chaux et ciment) ne doivent pas être utilisés à des températures supérieures à 35°C.

²⁰ Les mortiers avec liant sont sensibles aux paramètres que sont la température, l'hygrométrie, la vitesse du vent, qui agissent sur : la rhéologie du mortier et son évolution ; la vitesse de prise ; la cinétique de son durcissement et sa dessiccation. Cela influence sensiblement l'ouvrabilité mais également, à terme, la résistance mécanique du mortier, donc celle du mur.

6.3.1. DEMARRAGE DE LA MAÇONNERIE

Poser les 2 premières assises à sec afin de vérifier l'exactitude du calepinage. Afin de limiter la découpe de BTC tout en s'adaptant à la longueur de la cloison, il est conseillé de calepiner en tenant compte des tolérances acceptables pour les épaisseurs des joints (10 à 15 mm).

La surface d'application du mortier doit être préparée et propre. L'assise du premier rang de briques est réalisée sur un premier lit continu de mortier (sable-ciment de 2 cm d'épaisseur si la maçonnerie débute au niveau du sol fini, mortier terre sinon) (sur la bande de désolidarisation le cas échéant). Ce premier lit permet un réglage précis du premier rang de briques à l'aide de la règle et du niveau.

6.3.2. POSE DES BTC EN PARTIE COURANTE

Pour garantir une bonne adhérence entre mortier et blocs, les blocs seront humidifiés avant la pose : les BTCS seront plongés dans l'eau et immédiatement retirés et les faces des BTC (non-stabilisés) qui seront en contact avec le mortier seront légèrement humidifiés à l'aide d'une éponge ou d'une brosse large, type brosse à badigeon. Le plan de pose sera légèrement mouillé en utilisant la même technique. Le mortier est appliqué sur les faces à jointoyer en quantité adaptée.

Les BTC sont posés et mis en place sur le lit de mortier par collage en les plaquant en pression ou en les faisant translater jusqu'à avoir trouvé la position requise. Par effet de succion les BTC s'immobilisent. Il ne faut pas vibrer excessivement les BTC pour les positionner sous peine de supprimer l'adhérence entre le bloc et le mortier. Frapper ou marteler les BTC à l'aide d'une massette, d'un marteau ou même du manche de la truelle est également à proscrire, sous peine de provoquer des éclats du parement et des arêtes, ou même de fissurer les BTC, voire de déstabiliser les maçonneries précédemment mises en œuvre.

Contrôles

Tout au long du montage, les maçons doivent contrôler :

- l'horizontalité des blocs, positionnés à l'aide d'un niveau à bulle
- l'horizontalité des assises et l'alignement des joints, grâce à des cordeaux
- la verticalité de la paroi, au fil à plomb ou au niveau à bulle. L'aplomb peut être assuré par la mise en place au préalable de piges d'angle dont la verticalité a été contrôlée. Celles-ci servent de guide de pose.
- l'épaisseur de joints, par une mesure directe. Celle-ci devra être comprise entre 10 et 15 mm d'épaisseur. Il est recommandé de tracer les hauteurs d'assises sur les piges servant de guide afin d'obtenir une régularité et une bonne répartition verticale des joints sur toute la hauteur de la cloison.
- la planéité d'ensemble au moyen d'un cordeau tendu sur 10 mètres à la surface du mur ou plus localement à l'aide d'une règle de 1 m minimum et ce dans toutes les directions du plan vertical du mur (horizontal, vertical, oblique). D'un bloc à l'autre, dans le plan vertical du mur, un outil possédant une arête rectiligne (comme une règle courte de 30 cm) permettra d'assurer un contrôle de rectitude et de vérifier qu'il n'existe pas de défauts d'alignement des blocs.

Tolérances géométriques

Le contrôle du respect des tolérances dimensionnelles ainsi que le contrôle d'aspect permettent de réceptionner les ouvrages. Les tolérances dimensionnelles des ouvrages en BTC, écarts d'implantation (alignement vertical), aplomb (verticalité), planéité (rectitude) et épaisseur seront celles qui sont appliquées aux cloisons en maçonnerie de petits éléments²¹.

6.3.3. CADENCE DE POSE ET LIMITE D'ELEVATION QUOTIDIENNE

L'élévation des maçonneries de BTC pour une journée ne doit pas dépasser 10 fois l'épaisseur du mur (150 cm maximum de hauteur pour un mur de 15 cm d'épaisseur, 95 cm pour un mur de 9,5 cm d'épaisseur), au risque de désolidariser les premiers rangs par de trop fortes sollicitations latérales exercées sur l'ouvrage. Lors de la reprise des travaux de maçonnerie, il convient de s'assurer que le plan de pose soit propre et dépoussiéré.

De plus, lorsque la hauteur de parement dépasse 4,5 m de haut, il est demandé de réaliser de préférence les élévations de maçonnerie en deux étapes séparées d'une période de deux semaines. En cas de temps chaud et sec, ce délai peut être réduit à une semaine. Cette précaution de mise en œuvre vise à limiter le phénomène de tassement en partie haute lors du séchage.

6.3.4. MISE EN ŒUVRE DES ATTACHES

Les attaches sont fixées au mur support au fur et à mesure de l'avancement de la maçonnerie conformément aux prescriptions du fabricant.

Elles sont scellées dans les lits de mortier de la maçonnerie de parement. Leur extrémité se situe à une distance de la face visible du parement de :

²¹ NF DTU 20.13 P1-1

Modèle d'attaches	Maçonnerie de 95mm	Maçonnerie de 150mm
LSA-L de Halfen	40mm	75mm
SD / P de Ancon	30mm	75mm

6.3.5. COUPE, TAILLE, PERÇAGE

Couramment, sur chantier, il est recommandé de réaliser les coupes à l'aide d'une meuleuse équipée d'un disque pour maçonnerie (type disque diamanté) pour couper les blocs aux dimensions requises. On utilisera de préférence des disques de grands diamètres (230mm). Il est également possible d'utiliser un ciseau de maçon et une massette.

Les BTC contiennent des graviers qui peuvent faire dévier du plan de coupe ou provoquer des éclats importants des blocs. Le taux de perte des blocs sur chantier et de l'ordre de 5 %.

Les blocs se percent à l'aide de forets à pointe ou taillant carbure de tungstène, de type foret à béton. Le perçage s'effectue de préférence sans percussion mais par abrasion et enlèvement de matière. Pour les perçages précis, il est recommandé d'utiliser des forets pour métaux. Un trépan ou une scie cloche avec pastille au carbure de tungstène ou à lèvres diamantées peut être utilisé pour réaliser les réservations des boîtes électriques rondes.

On privilégiera l'utilisation de blocs $\frac{3}{4}$ et $\frac{1}{2}$ produits directement à ce format, en particulier si un appareillage très soigné des maçonneries apparentes est souhaité.

6.3.6. JOINTOIENT

La liaison des blocs doit être correctement faite dans les deux directions de l'appareil, par la réalisation des joints horizontaux et verticaux. Les joints verticaux doivent être bien bourrés. L'excédent de mortier doit être raclé immédiatement après la pose du bloc et si possible, les joints doivent être réalisés à frais pour une meilleure tenue (et limiter les tâches de laitance dans le cas de mortier stabilisé). Le joint en cours d'exécution doit être serré avant qu'il ne perde sa plasticité. La finition des joints peut être faite en demi-rond, en triangle ou au nu des blocs. Ils seront serrés au fer à joint, ou à la langue de chat. Sauf indication contraire, le profil du joint en retrait aura une profondeur maximale de 5 mm.

Les joints peuvent également être légèrement creusés si le mur est destiné à être rejointoyé ultérieurement. Lorsqu'un rejointoiement doit être effectué, la profondeur du grattage du mortier non durci est d'au moins 15 mm, sans dépasser 15 % de l'épaisseur du mur mesurée à partir de la surface finie.

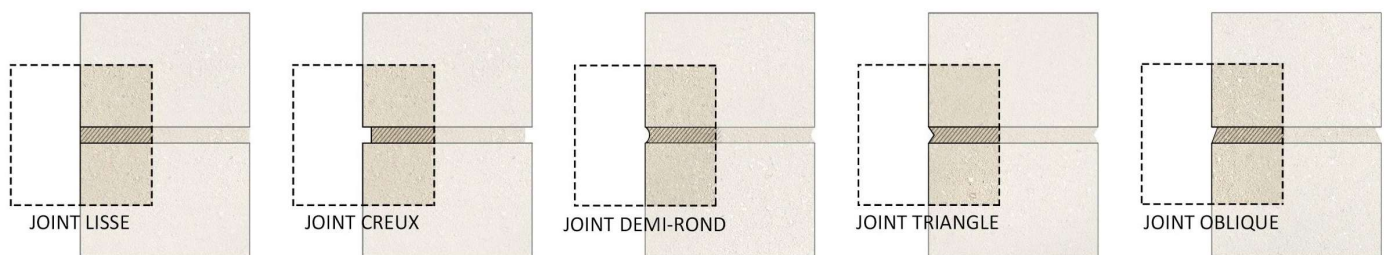


Fig. 22 : Joints autorisés

6.3.7. DERNIER RANG DE MAÇONNERIE

Avant la pose des derniers rangs de BTC, le cas échéant, la bande de désolidarisation doit être collée au plafond sur toute la largeur de la maçonnerie finie. Le dernier rang de BTC doit être maçonné en laissant un espace le plus réduit possible. Le tassement de la maçonnerie dans les jours qui suivent engendre une augmentation de cet espace et rend possible un bourrage au mortier terre (cf. A.6.4.1).

Cet espace peut aussi être laissé vide ou comblé localement par du mastic.

6.4. FINITION DE LA MAÇONNERIE

6.4.1. PREPARATION

Séchage, tassement

La disparition de l'humidité en excès dans le mur prend du temps. Un phénomène de tassement de la maçonnerie a lieu une fois la paroi terminée. Ce tassement vertical de la maçonnerie lors du séchage est de l'ordre de 0,3 à 0,4 %.

Il conviendra d'être attentif à ce que le tassement du mur se soit opéré et à ce que la paroi ne présente pas un taux d'humidité trop important avant la mise en œuvre des finitions. Il est fortement recommandé de respecter un délai minimum de séchage de 3 semaines avant l'application d'éventuelles finitions.

Bourrage de la partie haute

Le bourrage éventuel de l'espace entre maçonnerie et plafond sera effectué au mortier qui a servi à maçonner la paroi au minimum 2 à 3 semaines après l'étape de maçonnerie.

Préparation de la maçonnerie

Une fois la maçonnerie sèche, elle doit être balayée et/ou aspirée afin d'éliminer des grains et poussières non adhérents.

Pour uniformiser l'aspect et limiter quelques défauts visuels, le passage d'une taloche-éponge humide ou un léger égrainage de la surface de la maçonnerie avec un abrasif de type papier de verre de grain 120 peut être effectué.

Rejointoiement de la maçonnerie

L'opération de rejointoiement, le cas échéant, est précédée d'un nettoyage de la zone entière et si nécessaire, d'un mouillage pour obtenir la meilleure adhérence possible entre mur et mortier. Les joints horizontaux et verticaux doivent présenter une épaisseur finie comprise entre 10 mm minimum et 15 mm maximum.

Fissuration de retrait

Des fissurations légères ou des microfissurations, non structurelles, dues au retrait des maçonneries de BTC lors du séchage de l'ouvrage peuvent apparaître en partie courante du mur dans les mortiers de montage des blocs. Les tolérances d'acceptation de ces fissurations sont telles que :

- Elles ne présentent pas une largeur d'ouverture supérieure à 0,5 mm ;
- Elles ne sont pas prolongées dans les blocs ;
- Elles ne sont pas traversantes.

Ces tolérances d'exécution peuvent être redéfinies dans le cas où un mur prototype est réalisé à cet effet (cf. 5.1.1).

Dans le cas de maçonnerie non-stabilisée, il est simple de reboucher ces fissurations par passage d'une truelle à joints adaptée, fer à joint plat ou demi-rond, avec humidification préalable du mortier si nécessaire. En cas de maçonnerie stabilisée, privilégier un rejointoiement et veiller à bien resserrer les joints encore frais.

6.4.2. FINITIONS

La maçonnerie peut alors être laissée brute ou une finition peut être appliquée.

Fixateur, peinture et produits de finition

Sur les murs très sollicités (contact par frottement), il est possible d'appliquer un fixateur, un vernis (type vernis pour support pierre) ou une peinture (type peinture à base minérale), pour éviter que des poussières ou grains fins ne se détachent du mur.

Il conviendra alors d'employer des solutions non filmogènes et perméables à la vapeur d'eau.

Il faudra se référer aux caractéristiques et aux fiches produits des fabricants pour vérifier la compatibilité avec le support terre crue. Il s'agit souvent de produits à badigeonner ou à pulvériser sur des supports maçonnés tels que pierres naturelles, maçonnerie traditionnelle, enduits à base de terre ou chaux, qui conviennent dans la plupart des cas sur les BTC. Quelques références commerciales existent, citons par exemple les produits de type Terrafix Nature et Harmonie®.

Il existe également de nombreuses recettes faites de différents adjuvants, liquides ou en poudre, qui sont adaptés aux supports en BTC et généralement utilisées pour la finition des enduits²². Ce sont la plupart du temps des recettes ou produits à base de caséine, de sel d'alun, de méthylcellulose (colle à papier peint), des badigeons à base de chaux ou des solutions à base d'huile.

²² Guide des bonnes pratiques de la construction en terre crue - enduit en terre, ARESO, ARPE Normandie, AsTerre, ATOUTERRE, CAPEB, Collectif des terreux armoricains, FFB, Fédération des SCOP du BTP, Maisons paysannes de France, Réseau Écobâtir, TERA, décembre 2018.

Argiles et biopolymères : les stabilisants naturels pour la construction en terre, Vissac, Aurélie, Ann Bourgès, David Gandreau, Romain Anger, et Laetitia Fontaine. Villefontaine : CRAterre, 2017.

Dans tous les cas, il est conseillé de réaliser un essai sur une surface d'environ 1 m² afin de vérifier la bonne compatibilité de la recette avec le support et les modalités de pose.

Enduit

Dans le cas de la réalisation d'un enduit, sa réalisation doit respecter *les Règles professionnelles pour la mise en œuvre des enduits sur supports composés de terre crue*²³ validées par la Commission Prévention Produits mis en œuvre (C2P) de l'Agence Qualité Construction.

6.5. ENTRETIEN

Entretien courant

Un nettoyage des BTC est possible par brossage léger à sec, à l'éponge humide et / ou avec un abrasif de type papier de verre de grain 120.

Réparations et gestion des désordres

Avertissement : Ce document présente différentes règles liées au dimensionnement des ouvrages et à leur mise en œuvre, dont le respect garantit l'absence de malfaçons et de désordres. Néanmoins, dans un but d'information, le présent paragraphe présente les principaux désordres et leurs causes ainsi que quelques moyens d'y remédier.

Variation involontaire de la couleur du mur

En cas de variation involontaire de la couleur d'une maçonnerie en BTC, une homogénéité de couleur / surface peut être obtenue par passage d'une taloche-éponge humidifiée. En complément, pour marquer l'esthétique de la maçonnerie, il est possible de redessiner les joints à l'aide d'une truelle à joints adaptée, fer à joint plat ou demi-rond.

Fissures de retrait, épaufrures

En cas d'apparition de fissures de retrait au sein du mortier voire dans les angles des BTC, de l'eau sera appliquée sur la fissure à l'aide d'une éponge et la fissure sera rebouchée par frottement local grâce au mortier terre adjacent. Une ré-homogénéisation de la maçonnerie sera obtenue par passage d'une taloche-éponge humidifiée. En complément, pour marquer l'esthétique de la maçonnerie, il est possible de redessiner les joints à l'aide d'une truelle à joints adaptée, fer à joint plat ou demi-rond.

Dans le cas d'une maçonnerie stabilisée, il est possible de creuser le mortier fissuré et de procéder à un matage de la zone préalablement nettoyée.

Géométrie de mur non conforme

En premier lieu, il convient de s'assurer du bon fonctionnement des niveaux utilisés sur chantier. Un affaissement peut aussi être lié à un rythme de montage trop élevé du mur, ou à l'utilisation d'un mortier trop humide. Une reprise partielle ou totale du mur est conseillée. Le passage d'une éponge humide sur l'ensemble de la surface du mur après séchage de la nouvelle maçonnerie permet une homogénéisation de la couleur de la paroi.

Fissuration liée à un mouvement de la structure porteuse

Dans le cas où un mouvement non-anticipé de la structure porteuse (poteaux, raidisseurs ou poutres hautes ou basses) entraînerait une mise en charge des maçonneries et l'apparition de fissures, il est recommandé de procéder à un suivi de l'évolution de la fissuration.

En cas de stabilisation de la fissuration sans risque structurel avéré, il est possible de procéder au remplacement des BTC endommagés en travaillant les joints adjacents au ciseau de maçon, puis de maçonner des nouveaux BTC avec le même mortier terre (on notera la possibilité de réutiliser le mortier précédent dans le cas de mortier non-stabilisé). Le passage d'une éponge humide sur l'ensemble de la surface du mur après séchage de la nouvelle maçonnerie permet une homogénéisation de la couleur de la paroi.

En cas de mouvement excessif de la structure, il est recommandé de procéder à une reprise sur la structure elle-même avant de procéder au remplacement des BTC endommagés.

²³ *Règles professionnelles, Enduits sur supports composés de terre crue*, Réseau Écobâtir, éditions Le Moniteur, Paris, septembre 2013.

7. COMMERCIALISATION DU PROCEDE

Les produits Cycle Terre seront commercialisés sur site ou via des plateformes de distribution. Les produits commercialisés seront accompagnés d'un guide de pose illustré à l'usage des maçons.

Par ailleurs, un service d'assistance technique téléphonique sera assuré gratuitement par la Fabrique Cycle Terre. Un service d'accompagnement sur chantier est possible (contacter Cycle terre pour plus de renseignements).

8. FORMATION DES ENTREPRISES

Les qualifications requises pour les entreprises correspondent à celles d'une entreprise de maçonnerie et de béton armé de technicité courante qui assure l'édification de murs porteurs et les travaux de gros œuvre en BTC. La qualification au sein de l'entreprise sera au minimum équivalente au niveau III (N3 - position 1 ou 2) : Compagnon professionnel et de préférence équivalente au niveau IV (N4 - position 1 ou 2) : Chef d'équipe ou Maître ouvrier (selon la qualification de la Convention collective nationale des ouvriers employés par les entreprises du bâtiment du 8 octobre 1990.91).

L'entreprise devra justifier soit de la présence, au sein de son effectif, d'au moins une personne ayant suivi préalablement une formation certifiante relative à la maçonnerie de briques de terre crue, soit d'une expérience suffisante en maçonnerie de briques de terre crue. Elle doit dans ce cas établir une liste aussi complète que possible des chantiers qu'elle a réalisés en maçonnerie de briques de terre crue. Des attestations de bonne exécution des travaux, délivrées par la maîtrise d'ouvrage des opérations antérieures, pourront être produites pour justifier de la compétence de l'entreprise.

B. JUSTIFICATIONS TECHNIQUES

1. SATISFATIONS AUX LOIS ET REGLEMENTATIONS EN VIGUEUR

1.1. STABILITÉ ET RÉSISTANCE MÉCANIQUE

La justification du dimensionnement des parements est apportée par notes de calcul sur la base des essais suivants :

- Résistance moyenne à la compression des BTC selon la NF EN 772-1 : BTC et BTC stabilisé, compression sèche et humide (à 3% de teneur en eau pour BTC et 14% pour BTCS) ;
- Résistance à la compression du mortier selon la NF EN 1015-11 ;
- Résistance à la flexion sur murets selon la EN 1052-2 selon les 2 axes pour 2 formats de maçonneries non-stabilisées (épaisseur 9,5 cm et épaisseur 15 cm) et un format de maçonnerie stabilisée (épaisseur : 15 cm) ;
- Résistance au cisaillement selon la NF EN 1052-3 sur triplets maçonnés ;
- Résistance à la traction et à la compression des attaches métalliques selon la NF EN 846-5.

1.1.1. RESISTANCE A LA COMPRESSION DES BTC(S)

Les BTC et BTCS ont été testés à la compression selon la norme NF EN 772-1 par le CTMNC (rapports d'essai n° 2334020028/ESP200309-1/V2, 2334020028/ESP200591-1 et 2334020028/ESP200591-2, fournis en annexe) et par amàco (rapport d'essai « *Influence de la quantité d'eau résiduelle dans la maçonnerie BTC sur leur résistance à la compression* », fourni en annexe).

Tableau 7 : Synthèse des résultats d'essais à la compression sèche sur BTC(S)

	Nombre d'échantillons testés	Moyenne (MPa)
BTC (état sec)	10	6,8
BTCS (état sec)	10	5,9

Par ailleurs, les mesures de résistance à la compression réalisées sur BTCS (10 échantillons) à des teneurs en eau comprises entre 12,2 et 15,5%²⁴ permettent d'estimer la résistance des BTCS à l'état humide (14% de teneur en eau) à 3,9 MPa (diminution de la résistance à la compression de 33%).

Les mesures de résistance à la compression réalisées sur BTC (10 échantillons) à des teneurs en eau comprises entre 1,5 et 5,4%²⁵ permettent d'estimer la résistance des BTC à l'état humide (3% de teneur en eau) à 5,4 MPa (diminution de la résistance à la compression de 20%).

1.1.2. RESISTANCE A LA COMPRESSION DU MORTIER

Le mortier a été testé à la compression et à la traction par le CTMNC selon la norme NF EN 1015-11. Il en ressort les résultats suivants (échantillons stabilisés à 23°C +/- 2 et 50% +/- 5 d'HR, rapport d'essai n°2334020028_10 fourni en annexe) :

Tableau 8 : Synthèse des résultats d'essais à la compression et à la traction sur mortier

	Nombre d'échantillons testés	Moyenne (MPa)
Résistance à la traction	6	0,8
Résistance à la compression	12	2,2

De plus, la résistance à la compression du mortier a été mesurée à différentes teneurs en eau. Ces teneurs en eau ont été obtenues par séchage des échantillons de mortier en étuve (50°C, 20%HR), par équilibrage à l'air libre en laboratoire (20°C, 65%HR) et par confinement des échantillons en cours de séchage (20°C, HR >65%). Les teneurs en eau à l'équilibre du mortier sont inférieures à celles des BTC, ce qui s'explique par le fait que le mortier soit plus riche en sable. Elles sont d'environ 0,8% à 20% d'HR et de 1,2% pour les échantillons les plus humides. On estime que la diminution de la résistance à la compression du mortier entre sa teneur

²⁴ Ces teneurs en eau découlent d'une immersion pendant 2h des BTCS, conformément au protocole de compression humide décrit dans l'ancienne version de la norme XP P 13-901.

²⁵ Ces teneurs en eau découlent d'une imprégnation des BTC par humidification puis stockage en atmosphère confinée pendant 48h.

en eau de dimensionnement (20°C, HR 50%) et sa teneur en eau maximale (hors accident) est inférieure à 20% (cf. rapport « Influence de la quantité d'eau résiduelle dans la maçonnerie BTC sur leur résistance à la compression » d'amàco fourni en annexe).

1.1.3. RESISTANCE A LA FLEXION DE LA MAÇONNERIE

La maçonnerie a été testée à la flexion conformément à la norme NF EN 1052-2 par les laboratoires FCBA et 3SR (rapports d'essais n°403/20/154 du 22.09.2020 et n° CNRS/019/ S.Y fournis en annexe).

Les mesures ont été réalisées selon deux directions de sollicitation :

- fx1 (sollicitations parallèles au lit de pose) ;
- fx2 (sollicitations perpendiculaires au lit de pose).

La conversion entre fxi (moyenne mesurée) et fxki (valeur caractéristique) a été réalisée selon le protocole détaillé dans la norme NF EN 1052-2 (coefficient de passage de 1,5 pour 5 corps d'épreuve et traitement statistique logarithmique avec k=2,08 pour 7 corps d'épreuve).

Tableau 9 : Synthèse des résultats d'essais à la flexion sur maçonnerie

Format de BTC(S)		Nombre d'échantillons testés	Moyenne (MPa)	Valeur caractéristique (MPa)
BTC Classique	Fx1	7	0,058	0,05
	Fx2	5	0,173	0,12
BTC Parement	Fx1	5	0,069	0,05
	Fx2	5	0,269	0,18
BTCS Classique	Fx1	5	0,13	--
	Fx2	3	0,38	--

Les mesures ont été réalisées avec un mortier à teneur en eau élevée (2%). Elles sont défavorables par rapport aux cas usuels (teneur en eau du mortier inférieure à 1,4%).

Les valeurs caractéristiques n'ont pas été déterminées pour la maçonnerie stabilisée (nombre d'échantillons testés inférieur à celui exigé par la NF EN 1052-2). Le dimensionnement des maçonneries stabilisées est donc basé sur le cas défavorable de maçonnerie non-stabilisée.

1.1.4. RESISTANCE AU CISAILLEMENT DE LA MAÇONNERIE

La résistance au cisaillement de la maçonnerie a été mesurée par le CTMNC selon la norme NF EN 1052-3 (rapport d'essai n°2334020028_21 fourni en annexe). La campagne a porté sur 6 échantillons (BTC format parement, mortier Cycle Terre non stabilisé), la valeur moyenne est de 0,036 MPa et la valeur caractéristique de 0,026 MPa.

1.1.5. RESISTANCE DES ATTACHES METALLIQUES

Une campagne de résistance à l'arrachement des attaches de parement a été réalisée conformément à la norme NF EN 846-5 sur des doublets de BTC format parement maçonnés au mortier terre (cas le plus défavorable) (voir rapports d'essai n°2334020028_5, 2334020028_7, PO 21.045/V1 et PO 21.046/V1 fournis en annexe). Cette norme préconise 2 sens de chargement : en traction et en compression, l'attache étant insérée dans un lit de mortier entre 2 BTC, 5 répétitions par sens de chargement.

Les mesures ont été réalisées sur les attaches LSA-L de Halfen et SDV de Ancon. Les attaches SPV, SP28 (SD28) et TFMT de Ancon ont un embout identique aux attaches SDV testées. Le dimensionnement défini pour les SDV est donc étendu à ces différents modèles d'attaches.

Tableau 10 : Résistance à l'arrachement des attaches de liaison

	LSA-L de Halfen	SD / P de Ancon
Traction	546 N	636 N
Compression	614 N	1061 N

De plus, les attaches AMR de Ancon ont des performances déclarées à la traction et à la compression très supérieures à celles attaches type LSA-L de Halfen (mesurées selon la NF EN 846-5). Il est donc proposé un dimensionnement sur la base des essais réalisés sur ces dernières, soit 2 attaches/m². Il est néanmoins demandé à ce que soit réalisé des essais de résistance à la traction et à la compression de ces attaches conformément à la NF EN 846-5 en association avec la maçonnerie Cycle Terre avant mise en œuvre de ce type d'attaches (contacter Cycle Terre).

Tableau 11 : Tableau comparatif des performances déclarées des attaches LSA-L de Halfen et AMR de Ancon

	LSA-L de Halfen	AMR de Ancon
Traction	1050 N	2100 N
Compression	660 N	1200 N

1.1.6. SYNTHESE DE LA NOTE DE CALCUL POUR PAREMENT INTERIEUR

Les justifications sont effectuées par un modèle plaque dans les différentes configurations avec appuis ponctuels hors plans au niveau des attaches anti devers.

Hypothèses

Hauteur max entre console de recoupement en parement intérieur : 4 m en maçonnerie de 9,5 cm d'épaisseur, et 6 m en maçonnerie de 15 cm d'épaisseur.

Coefficient de sécurité pour le calcul de la maçonnerie de parement = 3.0

Coefficient de sécurité des attaches de liaisons de la maçonnerie de parement = 2.5

Pas de limite en hauteur des bâtiments considérés → pression dynamique de pointe du vent = 74.2 DaN/m²

Coefficient de pression intérieure considérée : C_{pi} = 0.3

Calculs limités pour les zones de vent Zone 2 avec v_b = 24 m/s avec Pression vent intérieure = 0.3*74.2 = 22.3 DaN/m²

Justification du nombre d'attaches

Avec un coefficient de sécurité de 2,7 (conforme accessoires EC6), un coefficient de passage de l'action caractéristique à l'action pondérée du vent à l'ELU de 1,5, et un coefficient de passage de la valeur moyenne mesurée à la valeur caractéristique de 0,7 (conformément au DTU 20.1 P3) :

F_d / attaches = 546*0,7/2,7 = 142 N/attache (LSA-L de Halfen) et 636*0,7/2,7 = 165 N/attache (SD / P de Ancon)

Pression à reprendre : 223*1.5 = 335 N/m²

Nombre d'attaches = 335 / 153N = 2,4 U/m² (LSA-L de Halfen) et 335 / 178 = 2,0 U/m² (SD / P de Ancon)

Soit un nombre d'attaches préconisé en partie courante de 3/m² (LSA-L de Halfen) et de 2/m² (SD / P de Ancon).

Le nombre d'attaches est augmenté :

- Aux niveaux des points singuliers (tête de mur, bords libres) : une attache tous les deux lits de BTC (verticalement) et d'une attache un BTC sur deux (horizontalement). Ces attaches doivent être à une distance du bord de la maçonnerie comprise entre 5 et 20cm ;
- D'une unité en partie courante dans les locaux humides et moyennement humides (classés EB et EB+P).

Justification de la résistance à la compression de la maçonnerie sous poids propre

Résistance caractéristique à la compression : f_{k-mac} = 0.4*2.0^{0.7}*2.0^{0.3} Mpa = 0.8 MPa

Effort normal sollicitant ELU N_{sd}

BTC 15 hauteur 6.00m : 0.15m*2000kg/m³*6m*1.35 = 2430kg/ml

BTC 9.5 hauteur 4.00m : 0.095m*2000kg/m³*4m*1.35 = 1026kg/ml

Effort normal résistant N_{Rd}

BTC 15: 1.0m * 0.15m*0.8MPa/3 = 4000 kg/ml

BTC 9.5: 1.0m * 0.095m*0.8MPa/3 = 2533 kg/ml

Justification de la résistance au cisaillement de la maçonnerie

Effort de cisaillement maximal sollicitant à l'ELU (calculé en tête de maçonnerie) :

BTC 9.5 hauteur 4.00m : 22,3*4*1,5/2 = 67 daN/ml

BTC 15 hauteur 6.00m : 22,3*6*1,5/2 = 100 daN/ml

Effort de cisaillement résistant :

BTC 9.5 : $0,095 \times 0,026 \text{ MPa} / 3 = 82 \text{ daN/ml}$

BTC 15 : $0,15 \times 0,026 \text{ MPa} / 3 = 130 \text{ daN/ml}$

Justification de la résistance en flexion de la maçonnerie

Les moments sollicitant sont estimés à : $M_{SD1} = 11,7 \text{ N.m/ml}$ et $M_{SD2} = 5,6 \text{ N.m/ml}$

Ces valeurs sont très inférieures aux moments résistants de la maçonnerie, estimés à :

$M_{RD1} = (0,05 \text{ MPa} / 3) \times 95 \text{ mm} \times 95 \text{ mm} / 6 = 47 \text{ N.m/ml}$

$M_{RD2} = (0,18 \text{ MPa} / 3) \times 95 \text{ mm} \times 95 \text{ mm} / 6 = 90 \text{ N.m/ml}$

On rappelle que les mesures de résistance à la flexion ont été réalisées dans le cas défavorable de mortiers à teneur en eau très élevées (2%).

La note de calcul complète a été établie par le BET structure Vessière et est fournie en annexe du dossier technique de l'ATEX.

L'ensemble de ces éléments montrent que les performances mécaniques de la maçonnerie sont très supérieures à ce que nécessaire pour un usage en parement intérieur, et qu'une baisse éventuelle des performances de la maçonnerie de l'ordre de 20% (due par exemple à une teneur en eau excessive des matériaux) ne remet pas en question ce dimensionnement.

1.2. STABILITÉ PARASISMIQUE

L'utilisation du parement objet de cette ATEX est limitée aux programmes pour lesquels aucune vérification n'est requise selon l'article 3 de l'arrêté du 22 octobre 2010.

1.3. SÉCURITÉ EN CAS D'INCENDIE

Les BTC et le mortier utilisés ne contenant pas de fibres, ils sont classés d'office M0 (classement national) ou A1 (classement européen).

1.4. ISOLATION THERMIQUE

Le BTC n'est pas isolant, sa conductivité thermique est de l'ordre de $0,8 \text{ W(m.K)}^{-1}$.

Placé à l'intérieur de l'enveloppe isolée, il apporte de l'inertie thermique au bâtiment, qui se traduit par un amortissement et un déphasage des variations de températures intérieures par rapport aux variations de températures extérieures, et améliore le confort hygrothermique, notamment via un lissage du taux d'humidité de l'air intérieur.

1.5. AFFAIBLISSEMENT ACOUSTIQUE

Deux mesures conformes à la norme NF EN ISO 10140 ont été réalisées au CSTB en décembre 2019 sur des murs BTC de 10 cm et 30 cm d'épaisseur. Elles ont été effectuées sur la bande de fréquence 50 Hz – 3150 Hz, après 54 jours de séchage des murs. A partir de ces mesures, une loi de comportement a été établie par le BET acoustique LASA et des simulations numériques réalisées pour estimer les affaiblissements de différentes épaisseurs de maçonnerie.

Ces simulations ont toutefois été réalisées sans attaches métalliques, qui dégradent la performance du complexe « mur support + mur de parement ». Dans le cas où le parement participerait à l'atteinte de l'affaiblissement acoustique souhaité par la paroi, l'impact de ces attaches devra être pris en compte par le BET acoustique de l'opération.

De plus, les R_w (C; Ctr) suivants ont été estimés pour des maçonneries dont les jonctions périphériques étaient munies de cornières ou tasseaux, ou autre système garantissant la bonne étanchéité acoustique. Enfin, l'éventuelle ventilation de la lame d'air positionnée entre le mur support et le mur de parement engendrera une dégradation de ces indices d'affaiblissement :

Tableau 12 : Affaiblissement acoustique de la maçonnerie

Epaisseur de maçonnerie	R_w (C; Ctr) en dB
Maçonnerie simple de 9,5 cm d'épaisseur	44 (-1; -3)
Maçonnerie simple de 15 cm d'épaisseur	47 (-1; -4)

2. APPRÉCIATION DE L'APTITUDE À L'EMPLOI

2.1. ESSAIS DE CHOCS

L'essai est réalisé conformément à la norme NF P 08-301 et au *Guide pour la présentation des éléments du dossier de demande d'Avis Technique relative à un procédé de cloison séparative du CSTB*, version validée le 16 octobre 2018.

Echantillons testés

Deux murs d'essais sont montés avec des BTC Cycle Terre format parement (315 mm x 95 mm x 95 mm) maçonnés avec mortier terre Cycle Terre non stabilisé.

Le mur A est monté sans attaches de liaison.

Le mur B est liaisonné avec un mur support en ossature bois par des attaches LSA-L de Halfen à raison de 5 attaches/m² en partie courante. La distance entre le mur de parement et le mur support est de 15 cm. Le mur support est constitué de montants bois de section 65x125 espacés de 60 cm et doublés d'un panneau OSB de 9 mm sur la face opposée au parement BTC.

Le mur A et le mur support du mur B sont montés dans un cadre en IPN muni de 4 jambes de force et doublé d'un cadre en bois. Lors de l'essai, le cadre est fixé mécaniquement au sol par des tiges métalliques de part et d'autre.

Protocole de mesure et d'analyse des résultats

Un sac sphéroconique conforme à la NF P 08-301 est utilisé pour réaliser un choc M50 à 400 J. Le sac est suspendu à un point haut situé dans le plan du mur, de façon à former un angle inférieur à 65° avec la verticale et à avoir une hauteur de chute de 80 cm (choc M50 de 400J). Le lâcher de sac sans vitesse initiale s'effectue par rupture de la corde de maintien du sac.

Ces essais portant sur les chocs de conservation des performances sont réputés satisfaits si le parement conserve ses performances, y compris son aspect, après choc M50.

De plus, des essais de chocs durs ont été réalisés selon le *Guide pour la présentation des éléments du dossier de demande d'Avis Technique relative à un procédé de cloison séparative du CSTB*, version validée le 16 octobre 2018, c'est-à-dire par réalisation de 3 chocs par point d'impact à l'aide d'une bille D0,5 conforme à la NF P 08-301 (bille de 500g). L'énergie de choc associée est de 2,5 J, correspondant à une hauteur de chute de 50cm. La mesure est réalisée en 3 points d'impact distincts (soit 9 chocs au total). L'essai est validé si la moyenne des diamètres suite au 3^{ème} impact est inférieure ou égale à 20mm.

Résultats

Cette campagne d'essai a permis de valider le choc mou M50 à 400 J, avec et sans attaches de liaison (voir rapport d'essai en annexe).

Une vidéo de synthèse de ces essais est disponible en ligne :

<https://medihal.archives-ouvertes.fr/hal-03024424/> ou <https://www.youtube.com/watch?v=B0lXpv4gZso&feature=youtu.be>

Des photographies et vidéos complémentaires sont disponibles sur demande (contacter Cycle Terre).

Tableau 13 : Résistance au choc dur de la maçonnerie

		Choc 2,5J 50cm de chute		
		Diamètre Impact n°1 (mm)	Diamètre Impact n°2 (mm)	Diamètre Impact n°3 (mm)
BTC	BTC n°1	13	16	16
	BTC n°2	13	15	15
	BTC n°3	12	14	15
BTCs	BTCs n°1	11	14	15
	BTCs n°2	12	15	17
	BTCs n°3	12	15	18

Les résultats de ces essais sont détaillés dans le rapport d'essai fourni en annexe. Ils permettent de classer le parement en catégorie Q4 (selon corps mou) et a minima Q3 (selon corps dur, les chocs de corps dur D1 permettant un classement Q4 n'ayant pas été réalisés) selon le *Cahier CSTB 3546_V2 de février 2008*.

Conclusion

Dans le cas de parement intérieur (aire d'activités au plus AA2), le classement Q3 suffit à une mise en œuvre en tout emplacement, y compris en rez-de-chaussée non protégé, y compris en ERP.

Ce parement en maçonnerie BTC format parement non stabilisé et mortier non stabilisé d'épaisseur 95 mm est considérée comme défavorable. Aussi, les essais satisfaits sur cette configuration sont considérés comme satisfaits pour les configurations suivantes :

- maçonnerie non stabilisée d'épaisseur 95 mm, format parement, support mur maçonné, voile béton ou ossature bois ;
- maçonnerie non stabilisée d'épaisseur 150 mm, format classique maçonné sur chant, support mur maçonné, voile béton ou ossature bois ;
- maçonnerie non stabilisée d'épaisseur supérieure, support mur maçonné, voile béton ou ossature bois ;
- l'ensemble de ces configurations avec mortier stabilisé (et BTC non-stabilisés) ;
- l'ensemble de ces configurations avec mortier stabilisé et BTC non-stabilisés.

2.2. ESSAI D'ACCROCHAGE-FIXATIONS DE CHARGES LOURDES

Deux séries d'essais ont été réalisées selon les protocoles de mesure suivants (voir rapport complet en annexe) :

- Suspension d'objets lourds en charge excentrée, conformément au protocole décrit dans le cahier 3750 du CSTB (*Source : <https://evaluation.cstb.fr/doc/groupe-specialise/cpt/cpt-3750.pdf>*). Deux consoles comportant chacune deux points de fixation, distants de 15 cm dans le sens vertical, sont fixées sur la cloison, avec un écartement de 50 cm et à 0,80 m du sol. Sur ces consoles, grâce à une entretoise horizontale et à 30 cm du parement, est appliquée une charge de 50 Kg. La flèche instantanée est mesurée. Ensuite, la charge passe à 100 Kg et reste appliquée pendant 24 heures. Les flèches avant et après 24 heures sont mesurées et les désordres éventuels observés. La charge est ensuite augmentée jusqu'à la ruine.
- Mesures d'arrachement, réalisées grâce à un extractomètre de type Dynatest (16 kN) mis à disposition de l'équipe Cycle Terre par Hilti. La mesure a été répétée 5 fois par couple fixation / support. Les fixations avec scellement chimique ont été montées conformément aux recommandations du fabricant dans la maçonnerie avant d'être testées à l'arrachement. Lors de l'essai, la charge est augmentée de manière continue de telle sorte que la charge de ruine soit atteinte au bout d'environ 1 minute, conformément aux recommandations du guide CISMA dédié (2014).

La maçonnerie support est une maçonnerie de BTC en format parement (315 mm x 95 mm x 95 mm, avec empreintes) et mortier terre Cycle Terre. Le mur mesure 2,6 m de haut et 3,5 m de large. Les moyens de fixation suivants ont été utilisés :

- Suspension d'objets lourds en charge excentrée : Les consoles sont fixées à 0,8 m de haut grâce à 4 vis HUS3 de Hilti (diamètre 8 mm et longueur 85 mm). Le perçage a été fait avec une perceuse (sans percussion) et une mèche de diamètre 8 mm sur une profondeur de 80 mm, ce qui correspond à environ 70 mm de profondeur d'implantation effective des vis. Une rondelle a permis d'assurer le contact entre la console et la tête de vis.
- Mesures d'arrachement : Deux types de fixation ont été utilisés : Vis HUS3 (marque HILTI) et Tiges HIT-V avec résine HY170 (marque HILTI) (à raison de 5 échantillons par types de fixation). Une attention particulière a été apportée à la perpendicularité du forage. Le perçage a été fait avec une mèche de diamètre 8 mm sur une profondeur de 70 mm, ce qui correspond à environ 65 mm de profondeur d'implantation effective des chevilles et vis.

Résultats :

- Suspension d'objets lourds en charge excentrée : Une première charge de 50 kg n'entraîne pas de flèche (inférieur à 1 mm). Après chargement à 100 kg, une flèche instantanée de 1 mm est mesurée, qui reste stable pendant 24h. Après 24h, la console est chargée jusqu'à rupture, obtenue pour 330 kg, avec une rupture du support.
- Mesures d'arrachement : Les ruptures ont eu lieu par glissement, précédé par l'apparition d'une micro-fissure.

Tableau 14 : Mesures de résistance à la traction de fixations (charges lourdes)

Type de fixation	Résultats (kN)					Moyenne (kN)
Vis HUS3	3,4	3,5	3,3	3,1	3,1	3,3
Tiges HIT-V avec résine HY170	5	5,5	4,2	5,2	4,3	4,8

2.3. MESURES DE RETRAIT ET DE TASSEMENT

La phase de séchage de la maçonnerie BTC est celle pendant laquelle les phénomènes de retrait et de tassement sont les plus importants. Des mesures ont donc été faites sur un mur de parement d'épaisseur 9,5cm pendant son séchage, de façon à estimer la variation dimensionnelle maximale prévisible pour la maçonnerie BTC.

Deux types de repères ont été positionnés sur le mur : 3 couples de tiges en bois insérées dans les joints de la maçonnerie à la pose et 3 couples de marques gravées dans les BTC, espacées de 2,5 à 4 m. Ces repères sont utilisés pour mesurer la déformation horizontale. Deux campagnes de mesure de distances entre ces repères sont réalisées, au montage et après un mois de séchage. Chaque mesure est prise deux fois, à l'aide d'un mètre (graduation : mm) et d'un laser.

Les mesures sont réalisées sur un mur de BTC de 9,5 cm d'épaisseur, de 2,8 m de haut et de 4,2 m de large.

Le mortier utilisé pour le montage du mur est le mortier Cycle Terre (sans ajout de liants). L'échantillon n'a pas été déplacé entre son montage et la réalisation des mesures. Il a séché à l'air libre, abrité, pendant environ 1 mois.

Tableau 15 : Mesures de retrait et de tassement au séchage de la maçonnerie

Mesures	Au montage (mm)	Après séchage (mm)	Déformation (mm/m)
Tiges 1	3745	3743	0,5
Tiges 2	3424	3421	0,9
Tiges 3	4043	4041	0,5
Marques 1	3392	3390	0,6
Marques 2	3429	3427	0,6
Marques 3	2538	2536	0,8

La moyenne des déformations horizontales liées au retrait est de 0,6 mm/m. Aucune fissuration liée au retrait n'a été observée sur le mur de 4,2m de long (épaisseur 95mm).

Remarque : Des mesures de retrait effectuées sur un mur monté sans attaches montrent que celles-ci n'ont pas d'influence sur le retrait de la maçonnerie, qui est dans les deux cas de 0,6mm/m. Ce retrait a aussi été constaté sur un mur de grandes dimensions (longueur 6,12m, hauteur 4m et épaisseur 15cm) :

Mesures	Au montage (mm)	Après séchage (mm)	Déformation (mm/m)
Marques 1	4795	4792	0,6
Marques 2	5673	5670	0,4

Repères	Au montage (mm)	Après séchage (mm)	Tassement (mm/m)
Vertical 1 (mur H2,8)	2913	2903	3,6
Vertical 2 (mur H2,8)	2917	2908	3,2
Vertical 3 (mur H2,8)	2914	2905	3,2
Vertical 1 (mur H4)	3901	3893	2
Vertical 2 (mur H4)	3895	3879	4
Vertical 3 (mur H4)	3902	3895	2

Soit un tassement moyen de l'ordre de 3mm/m.

2.4. JUSTIFICATION DE LA COMPATIBILITE DES DEFORMATIONS DE L'OSSATURE ET DU PAREMENT

La compatibilité entre les déformations verticales de la structure et celles du parement sont assurées par le choix d'attaches adaptées et l'insertion de bandes de désolidarisation et / ou d'un espace vide en tête de parement. De plus, la flèche active du plancher bas support du parement est limitée à L/500.

Les seuils de déformations maximales du mur support ont été déterminés sur la base d'essais et d'échange avec les fabricants d'attaches.

Les déformations horizontales dans le plan de la structure sont limitées à H/300 (ou H/500 dans le cas d'attaches LSA-L de Halfen ou équivalent) à l'ELS. Celles de la maçonnerie sont uniquement liées au retrait au séchage (absence de risque de surchauffe liée à une exposition au rayonnement solaire direct de la maçonnerie) et sont limitées par les longueurs de maçonnerie (inférieures à 430 cm).

Les déformations horizontales hors plan de la structure sont limitées à H/300 à l'ELS. Des mesures de déformations hors plan à la rupture ont été réalisées lors des essais de flexion au FCBA et au laboratoire 3SR. Les déplacements moyens hors plan suivants ont été mesurés à l'apparition de la première fissure :

Tableau 16 : Déformations hors plan de la maçonnerie à la rupture

	Hauteur (mm)	Largeur (mm)	Déplacement hors plan à la rupture (mm) BTC	Déplacement hors plan à la rupture (mm) BTCS
Muret V (fx1)	870	485	4,6	2,1
Muret H (fx2)	416	950	3	3,7

Soit un rapport entre déplacement et hauteur (ou largeur) de maçonnerie de l'ordre de H/400 dans le cas le plus défavorable. Or, les mesures sur murets de faible hauteur sont défavorables par rapport à des mesures sur murs de grande hauteur. De plus, la déformation du support est en partie absorbée par le système d'attaches. Le déplacement admissible hors plan du mur support est donc fixé à H/300.

2.5. ESSAIS D'ARRACHEMENT D'ENDUITS

Des essais de traction et de cisaillement ont été réalisés sur les enduits Cycle Terre appliqués sur support BTC (voir rapport d'essai fourni en annexe). Les charges à la rupture sont très supérieures à 2 kg et ont été appliquées pour une durée supérieure à 30 secondes, dépassant donc les seuils exigés dans le cadre des Règles Professionnelles validées par l'AQC (*Règles professionnelles, Enduits sur supports composés de terre crue*, Réseau Écobâtir, éditions Le Moniteur, Paris, septembre 2013).

2.6. JUSTIFICATION DU COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE DU COMPLEXE DE FACADE

Cas des locaux EA ou EB :

Il s'agit de locaux à hygrométrie faible à moyenne au sens du cahier 3567 de mai 2006 du CSTB: *Classement des locaux en fonction de l'exposition à l'humidité des parois et nomenclature des supports pour revêtements muraux intérieurs*.

Le logiciel Wufi Pro 6.5 a été utilisé pour simuler le comportement hygrothermique des parois proposées, et en particulier le cas défavorable d'un parement maçonné utilisé en intérieur de façade.

Différentes situations ont été comparées :

- Variation du type de murs supports (voile béton 20cm isolé par l'extérieur par 18cm de laine de verre type Isover Isoconfort 032 ou mur à ossature bois composé d'un pare-pluie de Sd=0,5m, de 28cm de laine de verre type Isover Isoconfort 032 et d'un pare-vapeur de Sd=20m) ;
- Variation de l'épaisseur de BTC (9,5cm et 15cm) ;

- Présence ou non d'une lame d'air ventilée (taux de renouvellement d'air : 0,5vol/h) ;
- Variation de l'orientation du mur (Nord, Sud) et de la hauteur de façade (hauteur comprise entre 10 et 20m et hauteur supérieure à 20m) ;
- Variation de la charge humide côté intérieur.

Une variante supplémentaire correspond à la mise en œuvre de parements BTC entre deux locaux humides.

Données d'entrée

Le fichier météo utilisé est celui de Trappes (78).

Climat intérieur correspondant à un local à charge en humidité faible et élevée au sens de la norme EN 15026, permettant de simuler un emplacement respectivement en local EA et EB.

Teneur en eau initiale de la maçonnerie BTC de 80kg/m³.

Le parement extérieur est un parement en briques cuites extrudées.

Tableau 17 : Paramètres d'entrée de caractérisation des BTC

Densité volumique	1975 kg/m ³		
Porosité	0,3		
Chaleur spécifique	830 J/(kg.K)		
Conductivité thermique	0,8 W/(m.K)		
Résistance à la diffusion de vapeur d'eau	10		
Capillarité	270 g/(m ² √s)		
Sorption	HR	Teneur en eau	
	20%	30 kg/m ³ 1,5%	
	50%	43 kg/m ³ 2,2%	
	80%	60 kg/m ³ 3%	
	98%	140 kg/m ³ 7%	

Ces valeurs ont été déterminées soit par mesure directe sur les BTC Cycle Terre (densité volumique, porosité), soit par comparaison avec des matériaux terre similaires lorsque la sensibilité des paramètres est faible (chaleur spécifique, conductivité thermique, résistance à la diffusion de vapeur d'eau, capillarité).

Les valeurs de sorption ont été déterminées par définition d'un profil usuel correspondant aux terres utilisées pour les BTC par l'ENTPE (Champiré, Fabbri, Morel, McGregor, 2016, "Impact of relative humidity on mechanical behavior of compacted earth for building constructions") et calibré grâce à des mesures de teneur en eau réalisées sur les matériaux Cycle Terre à 30% d'HR et 65% d'HR (rapport Cycle Terre - amàco « Influence de la quantité d'eau résiduelle dans la maçonnerie BTC sur leur résistance à la compression » fourni en annexe).

Résultats

Le rapport complet est fourni en annexe. Par simplification, le rapport compile les données des 7 cas suivants :

Tableau 18 : Cas présentés dans le rapport d'étude Wufi

	Mur support	Epaisseur BTC	Climat intérieur
Cas A	Voile béton + ITE	95	Humidité élevée
Cas B	Voile béton + ITE	150	Humidité élevée
Cas C	Ossature bois	95	Humidité élevée
Cas D	Voile béton + ITE	95	Humidité faible
Cas E	Voile béton + ITE	95	Humidité très élevée
Cas F	Voile béton + ITE	95	Climat intérieur avec humidité élevée des deux côtés de la paroi
Cas G	Voile béton + ITI	95	Humidité élevée

La variation de l'orientation de la façade et de la hauteur de façade ont été étudiées et n'ont pas d'influence sur le parement intérieur ; les cas correspondants ne sont donc pas détaillés dans le rapport. Une orientation Nord et une façade de hauteur supérieure à 20m ont été retenues pour les cas A à E.

L'influence de la ventilation de la lame d'air et de l'épaisseur de la maçonnerie est très faible.

Remarque : Des simulations réalisées avec un taux de ventilation de la lame d'air très supérieur (10 vol/h) montrent une légère baisse des teneurs en eau des BTC (0,05%).

Dans les locaux à charge humide faible (cas D), le pic estival de teneur en eau des BTC atteint 2,3%.

Dans les locaux à charge humide élevée (cas A à C et F), le pic estival de teneur en eau des BTC atteint 2,6%. Dans le cas d'une ITI (cas G), le pic estival de teneur en eau des BTC atteint 2,7%.

Dans ces conditions d'utilisation (teneur en eau <3%), la baisse des performances mécaniques de la maçonnerie non-stabilisée est estimée à moins de 20% (rapport Cycle Terre - amàco « *Influence de la quantité d'eau résiduelle dans les BTC sur leur résistance à la compression* » daté du 10 octobre 2021 et fourni en annexe et Champiré, Fabbri, Morel, McGregor, 2016, "*Impact of relative humidity on mechanical behavior of compacted earth for building constructions*", Laou L., Aubert J.E., Yotte S., Maillard P. et Ulmet L., 2020, "*Hygroscopic and mechanical behaviour of earth bricks*" et Heath A., Walker P., Fourie C., Lawrence M., 2009, "*Compressive strength of extruded unfired clay masonry unit*").

Cas des locaux EB+P :

Des simulations ont aussi été réalisées avec un climat intérieur classe 4 selon la norme ISO 13 788, soit des charges en humidité de l'air pouvant atteindre 8 g/m³ (la charge humide des locaux à hygrométrie forte type EB+P étant limitée à 7,5 g/m³) (cas E du tableau 19).

Les autres hypothèses d'entrée ont été conservées.

La teneur en eau maximale des BTC peut atteindre 2,9%.

Il est rappelé qu'il est demandé d'utiliser des BTCS et du mortier stabilisé pour cet usage.

Ventilation des locaux :

Selon une étude menée par le CTMNC et le LMDC et présentée au congrès Terra 2016 (Maillard P., Aubert J.E., « *Hygrothermal properties of extruded earth bricks* », Actes de la conférence Terra 2016), lorsque l'humidité relative ambiante passe de 60% à 80% (température de 23°C), les briques de terre exposées nécessitent 700h pour atteindre leur nouvelle teneur en eau d'équilibre (la moitié du palier étant atteint après 200h d'exposition). Ces mesures sont réalisées sur des cubes de 5cm de côté, dont deux faces sont exposées à l'humidité ambiante. La faible taille des échantillons leur permet d'absorber la vapeur d'eau beaucoup plus rapidement que la maçonnerie en situation réelle. Le phénomène de sorption est relativement lent et en situation réelle, il est très peu probable que la maçonnerie atteigne sa teneur en eau d'équilibre à 80% en moins de 200h (soit 8,3 jours).

Il est donc demandé à ce que la ventilation des locaux chauffés soit suffisante pour que l'humidité relative moyenne journalière ne dépasse pas 80% plus de 7 jours d'affilée.