

Sur le procédé :

Murs Procédé GBE®

Titulaire(s) : **Société GBE**
Internet : <https://www.gbe-innovation.fr/>

Société Lafarge France
Internet : <https://www.lafarge.fr/>

Descripteur :

Procédé de mur de façade de type « sandwich » mettant en œuvre deux parois en béton armé coulées en place simultanément avec interposition d'un isolant. Le procédé de mur GBE est destiné à la réalisation de murs périphériques de bâtiments d'usage courant à ossature en béton armé et il assure une fonction porteuse (le voile intérieur est porteur).

La paroi extérieure est systématiquement appuyée en partie basse et rattachée par le biais d'épingles en acier inoxydable à la paroi intérieure porteuse.

L'épaisseur minimale du mur est de 29 cm : la paroi extérieure dilatante a une épaisseur supérieure ou égale à 10 cm, la couche continue d'isolant a une épaisseur comprise entre 5 et 34 cm et les éléments structurels de la paroi intérieure ont une épaisseur allant de 14 à 45 cm. La couche d'isolant sert également de coffrage perdu pour les faces intérieures des parois béton coulées en place.

Les deux parois en béton sont reliées entre elles par des épingles en acier inoxydable ancrées dans le voile extérieur et dans la structure intérieure, qui traversent l'isolant.

La liaison horizontale en pied des voiles intérieurs et extérieurs est une reprise de bétonnage réalisée avec des armatures en attentes : il n'y a pas de joint horizontal à ce niveau.

Les menuiseries extérieures, équipées ou non d'appuis de baies métalliques, sont rapportées en œuvre. Un précadre métallique peut être incorporé dans le coffrage avant le bétonnage.

L'étanchéité des joints de dilatation verticaux et horizontaux de la paroi extérieure est assurée par fond de joint expansif avec mise en œuvre d'un mastic de 1ère catégorie ou par cordons pré-comprimés d'étanchéité ou par bande de membrane EPDM disposée en fond de joint avant le coulage du béton.

Groupe Spécialisé n° 3.2 - Murs et accessoires de mur

Famille de produit/Procédé : Mur de façade de types panneaux sandwich

AVANT-PROPOS

Les Avis Techniques et les Documents Techniques d'Application sont destinés à mettre à disposition des acteurs de la construction des éléments d'appréciation sur la façon de concevoir et de construire des ouvrages au moyen de produits ou procédés de construction dont la constitution ou l'emploi ne relèvent pas des savoir-faire et pratiques traditionnels.

Au terme d'une évaluation collective, l'avis technique de la commission se prononce sur l'aptitude à l'emploi des produits ou procédés relativement aux exigences réglementaires et d'usage auxquelles l'ouvrage à construire doit normalement satisfaire.

Versions du document

Version	Description	Rapporteur	Président
v3	<p>Cette version intègre les modifications suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Modification du calcul de la longueur libre des épingles, • Révision de la méthode de dimensionnement de la paroi extérieure (dilatation bridée) et des épingles de liaison sous les effets thermiques : déterminations des nouveaux coefficients de bridage, vérification de la maîtrise de la fissuration, prise en compte des ouvertures ; afin de mieux s'aligner à la méthode Eurocode 2. • Augmentation de la hauteur de chute du béton à 5 m sous respect des conditions présentées dans l'Avis Technique. 	Angel JUNES	Roseline BERNARDIN-EZRAN

Table des matières

1	Avis du Groupe Spécialisé	5
1.1	Définition succincte	5
1.1.1	Description succincte	5
1.2	AVIS	5
1.2.1	Domaine d'emploi accepté	5
1.2.2	Appréciation sur le procédé	5
1.2.3	Prescriptions Techniques	7
1.3	Remarques complémentaires du Groupe Spécialisé	9
2	Dossier Technique	10
2.1	Données commerciales	10
2.1.1	Coordonnées	10
2.2	Principe et domaine d'emploi	10
2.2.1	Principe	10
2.2.2	Domaine d'emploi	11
2.3	Matériaux	11
2.3.1	Béton	11
2.3.2	Acier d'armature	11
2.3.3	Acier de liaison inoxydable	11
2.3.4	Pièces plastiques	11
2.3.5	Isolant	12
2.4	Conception et dimensionnement	13
2.4.1	Principe de conception	13
2.4.2	Conception des parois	14
2.4.3	Étanchéité	26
2.4.4	Isolation thermique	26
2.4.5	Isolation acoustique	27
2.5	Mise en œuvre	27
2.5.1	Étapes de mise en œuvre	27
2.5.2	Éléments particuliers	30
2.6	Mode d'exploitation	32
2.6.1	Rôle et responsabilités	32
2.6.2	Formation	34
3	Résultats expérimentaux	34
3.1	Acoustique	34
3.2	Thermique	34
3.3	Structure	35
3.4	Matériaux	35
3.5	Résistance au feu	35
4	Références	35
4.1	Données environnementales	35
4.2	Références chantier	35
5	Annexes	37
	Annexe I : Méthodologie de dimensionnement du Procédé GBE – Stabilité	37
	Annexe II : Force sismique Fah (en N/m ²) en fonction du coefficient sismique (CS) et de l'épaisseur de la paroi extérieure	49

Annexe III : Moment sollicitant M (en $N \cdot m$) en fonction de la force sismique ou de vent et de la hauteur entre les épingles	50
Annexe IV : Section d'acier nécessaire A_a (en cm^2/m) en fonction du moment sollicitant et de l'épaisseur de la paroi.....	51
Annexe V : Comportement sous charges de construction (en complément de la section)	53
Annexe VI : Charge de compression appliquée sur les épingles N_b, E_d (kN/m) en fonction de la force F_{ah} et de la hauteur entre les épingles (en U ou en L)	55
Annexe VII : Abaques pour le dimensionnement des épingles en compression (Épingles en U ou en L).....	56
Annexe VIII : Déplacement maximal (en mm) en fonction du gradient de température ΔT et de la distance.....	58
Annexe IX : Longueur libre des épingles (en cm) en fonction du déplacement u et du diamètre φ (épingles en U ou en L).....	61
Annexe X : Epaisseur minimale (voile intérieur + isolant) permettant la mise en place d'épingles en U en fonction de la distance maximale de dilatation thermique pour une variation de température de $\Delta T=50$ °C.....	62
Annexe XI : Contrôle de l'ouverture des fissures.....	63
Annexe XII : Traitement des ouvertures dans les voiles.....	65
Annexe XIII : Exemple d'hypothèses et de méthode de modélisation	66
Annexe XIV : Valeur indicative de l'ouverture des fissures maximale sous chargement thermique.....	72
Annexe XV : Système de positionnement et d'assemblage	73
Annexe XVI : Méthode constructive.....	76
Annexe XVII : Schémas et détails type du procédé GBE	86
Annexe XVIII : Exemple de fiche d'autocontrôle	106
Annexe XIX : Distribution des températures dans le voile intérieur (conformément à l'appréciation de laboratoire n° AL16-176_V2)	107

1 Avis du Groupe Spécialisé

Le Groupe Spécialisé n° 3.2 - Murs et accessoires de mur 3.2 - Murs et accessoires de mur de la Commission chargée de formuler les Avis Techniques a examiné, le 03 juillet 2021, le procédé **Murs Procédé GBE®**, présenté par la Société GBE. Il a formulé, sur ce procédé, l'Avis Technique ci-après. L'avis a été formulé pour les utilisations en France métropolitaine et dans les DROM.

1.1 Définition succincte

1.1.1 Description succincte

Procédé de mur de façade de type « sandwich » mettant en œuvre deux parois en béton armé coulées en place simultanément avec interposition d'un isolant. Le procédé de mur GBE est destiné à la réalisation de murs périphériques de bâtiments d'usage courant à ossature en béton armé et il assure une fonction porteuse (le voile intérieur est porteur).

La paroi extérieure est systématiquement appuyée en partie basse et rattachée par le biais d'épingles en acier inoxydable à la paroi intérieure porteuse.

L'épaisseur minimale du mur est de 29 cm : la paroi extérieure dilatée a une épaisseur supérieure à 10 cm, la couche continue d'isolant a une épaisseur comprise entre 5 et 34 cm et les éléments structurels de la paroi intérieure ont une épaisseur allant de 14 à 45 cm. La couche d'isolant sert également de coffrage perdu pour les faces intérieures des parois béton coulées en place.

Les deux parois en béton sont reliées entre elles par des épingles en acier inoxydable ancrées dans le voile extérieur et dans la structure intérieure, qui traversent l'isolant.

La liaison horizontale en pied des voiles intérieurs et extérieurs est une reprise de bétonnage réalisée avec des armatures en attentes : il n'y a pas de joint horizontal à ce niveau.

Les menuiseries extérieures, équipées ou non d'appuis de baies métalliques, sont rapportées en œuvre. Un précadre métallique peut être incorporé dans le coffrage avant le bétonnage.

L'étanchéité des joints verticaux et horizontaux de la paroi extérieure est assurée par fond de joint expansif avec mise en œuvre d'un mastic de 1ère catégorie ou par cordons pré-comprimés d'étanchéité ou par bande de membrane EPDM disposée en fond de joint avant le coulage du béton.

Revêtement

Extérieur : parements extérieurs en béton ou tout type de revêtement rapporté sur béton.

Intérieur : finitions classiques sur béton.

1.2 AVIS

L'Avis porte uniquement sur le procédé tel qu'il est décrit dans le Dossier Technique joint, dans les conditions fixées au paragraphe Prescriptions Techniques (§1.2.3).

1.2.1 Domaine d'emploi accepté

Murs de façade destinés à des bâtiments tertiaires, ERP, industriels, de commerce et d'habitation à ossature en béton armé (sauf ITGH), pouvant comporter une hauteur isolée enterrée de 6 m maximum. Pour la partie enterrée du double mur GBE bordant des locaux, la paroi extérieure devra être revêtue d'un complexe d'étanchéité et avoir une épaisseur minimale de 15 cm.

La hauteur libre de la paroi extérieure entre lignes d'épingles est limitée à 6 m. La hauteur libre maximale entre planchers est de 14 m. Pour des hauteurs libres entre planchers supérieures à 6 m, une ligne intermédiaire d'épingle de liaison en U devra être interposée entre les deux planchers et les dimensions du double mur GBE devront respecter les prescriptions de l'Annexe X.

La hauteur maximale de la paroi extérieure sans recoupement par joint horizontal est limitée à 28 m.

Pour un mur GBE dont la hauteur de coulage du béton est supérieure à 5 m, l'épaisseur des parois devra être 15 cm au minimum afin de permettre le passage des tubes plongeurs sur chaque paroi.

Possibilité d'emploi en zones de sismicité 1 à 5 (selon l'arrêté du 22 octobre 2010 modifié) moyennant les dispositions spécifiques définies dans le Dossier Technique et complétées par les prescriptions techniques correspondantes du paragraphe 2.3 ci-après. En situation sismique, l'épaisseur de la paroi intérieure doit être de 15 cm au minimum conformément à la norme NF EN 1998-1.

Cet Avis est formulé pour les utilisations en France européenne et dans les DROM.

1.2.2 Appréciation sur le procédé

1.2.2.1 Satisfaction aux lois et règlements en vigueur et autres qualités d'aptitude à l'emploi

Stabilité

La stabilité des ouvrages à laquelle peuvent être associés, dans les limites résultant de l'application des Prescriptions Techniques ci-après, les murs réalisés selon ce procédé, peut être normalement assurée.

Les systèmes associés à ce procédé de mur, et en particulier les systèmes de plancher, doivent être vérifiés suivant les prescriptions des textes de référence s'y rapportant (DTU ou Avis Technique suivant le caractère traditionnel ou non du système concerné).

La stabilité propre du voile de béton extérieur du mur peut être normalement assurée moyennant l'application des prescriptions techniques ci-après.

Utilisation en zone sismique

L'utilisation du procédé de mur en zones sismiques 1 à 5 au sens de l'arrêté du 22 octobre 2010 modifié est possible moyennant le respect des dispositions prévues au paragraphe 1.2.3.2 des Prescriptions Techniques.

Sécurité au feu

Réaction au feu

Le parement en béton bénéficie conventionnellement du classement de réaction au feu A1.

Résistance au feu

Du fait de la présence de l'isolant dans les murs, les règles simplifiées de la NF EN 1992-1-2 de détermination de la distribution de la température dans le béton ne peuvent pas s'appliquer. L'appréciation de laboratoire n°16-176, établie par le CSTB, fournit les champs de température à considérer, dans la limite d'une durée de tenue au feu de 2h, pour le dimensionnement de la paroi intérieure suivant la NF EN 1992-1-2. Ces tableaux sont rappelés en Annexe XIX du Dossier Technique.

L'Appréciation de Laboratoire AL16-176_V2 présente également une méthodologie de vérification de la tenue de la paroi extérieure du mur « Procédé GBE » en tenant compte des différentes configurations d'épingles à l'intérieur du mur (en U inversé ou en L). Les prescriptions données par la méthode proposée permettent de déterminer le nombre d'épingles nécessaires en fonction de la durée de stabilité au feu requise (jusqu'à 2h).

Pour des exigences de stabilité au feu supérieures à 2h, la stabilité au feu du procédé devra être justifiée au cas par cas dans le cadre d'Avis de chantier délivrés par un laboratoire agréé.

L'Appréciation de Laboratoire n° AL 16-176_V2 décrit les dispositions constructives permettant le respect des principes l'IT 249, notamment au pourtour des ouvertures. Elle prescrit également les dispositions constructives à respecter pour la justification du procédé mis en œuvre dans des bâtiments d'habitation de la 3^{ème} et 4^{ème} famille et les Immeubles de Moyenne Hauteur IMH (bâtiment à usage d'habitation dont le plancher bas du logement le plus haut est situé à plus de 28 m sans être considéré immeuble de grande hauteur)

Prévention des accidents lors de la mise en œuvre

Elle peut être normalement assurée moyennant les précautions propres à l'utilisation de banches industrielles et à l'échafaudage d'éléments lourds de grandes dimensions.

Les banches et les passerelles (plate-forme) devront être utilisées et vérifiées conformément aux prescriptions du fournisseur, conformément aux recommandations dont elles font l'objet (Recommandations de l'INRS n°R399 et R464) et conformément aux prescriptions de la norme NF P93-350. La stabilité du support sur lequel les passerelles sont accrochées devra également être vérifiée.

Résistance au choc

Par analogie aux ouvrages traditionnels, le procédé est considéré comme satisfaisant vis-à-vis des exigences de résistance aux chocs définies dans la norme expérimentale P 08-302.

Isolation thermique

Elle est assurée par l'isolation intégrée dans le mur. Ce système d'isolation thermique par l'extérieur permet d'éviter les ponts thermiques courants.

Afin que l'isolant joue convenablement son rôle, la présence en parement extérieur d'une garniture de joint apte à assurer, au droit des joints, sa protection à l'eau est indispensable. Le maintien des performances thermiques suppose l'utilisation d'isolants dont les performances ne sont pas dégradées de manière significative par l'humidification possible au niveau des joints.

Les vérifications sont à effectuer, dans chaque cas d'utilisation, selon les Règles Th-Bat en vigueur.

Isolation acoustique

A défaut de résultat expérimental, l'indice d'affaiblissement acoustique des murs extérieurs vis-à-vis des bruits de l'espace extérieur peut être déterminé sur la base de l'application de la loi de masse.

Etant donné les épaisseurs de béton minimales mises en jeu, il est alors estimé que ce procédé de mur peut permettre d'obtenir la valeur d'isolement minimale de la réglementation fixée à 30 dB.

Étanchéité des murs extérieurs

Moyennant l'application des dispositions définies dans le Dossier Technique pour le traitement des joints de la paroi extérieure, l'étanchéité peut être considérée comme normalement assurée dans le domaine d'emploi accepté.

Confort d'été

Pour la détermination de la classe d'inertie thermique quotidienne des bâtiments, qui constitue un facteur important du confort d'été, les murs extérieurs de ce procédé appartiennent à la catégorie des parois lourdes à isolation rapportée à l'extérieur. Leur

inertie est déterminée au moyen des règles TH-Bat et la masse surfacique utile à prendre en compte dans les murs extérieurs est celle de la paroi intérieure.

Finitions-Aspect

Les finitions prévues sont à l'extérieur et à l'intérieur les finitions classiques sur béton. Leur comportement ne pose pas de problème particulier.

Liaisons avec les ouvrages de second œuvre

Les ouvrages de second œuvre (menuiseries, coiffes d'acrotères, volets roulants, etc.) ne devront pas gêner la dilatation du voile extérieur.

Données environnementales

Le procédé de mur « Murs GBE » ne dispose d'aucune Déclaration Environnementale (DE) et ne peut donc revendiquer aucune performance environnementale particulière. Il est rappelé que les DE n'entrent pas dans le champ d'examen d'aptitude à l'emploi du procédé.

Aspects sanitaires

Le présent avis est formulé au regard de l'engagement écrit du titulaire de respecter la réglementation, et notamment l'ensemble des obligations réglementaires relatives aux produits pouvant contenir des substances dangereuses, pour leur fabrication, leur intégration dans les ouvrages du domaine d'emploi accepté et l'exploitation de ceux-ci. Le contrôle des informations et déclarations délivrées en application des réglementations en vigueur n'entre pas dans le champ du présent avis. Le titulaire du présent avis conserve l'entière responsabilité de ces informations et déclarations.

1.2.2.2 Durabilité – Entretien

La garniture extérieure des joints est constituée d'un mastic élastomère à bas module présentant une bonne déformabilité. Une telle caractéristique est indispensable compte tenu de l'amplitude des variations dimensionnelles des joints entre panneaux extérieurs et des joints entre menuiseries et béton extérieur par suite du choix du voile intérieur pour recevoir la fixation.

La liaison entre le voile extérieur et la structure intérieure, réalisée par des épingles en acier inoxydable, est considérée comme durable et sans influence sur la durabilité des murs dans lesquels elle est incorporée.

Moyennant les précautions de mise en œuvre et les limitations précisées dans les Prescriptions Techniques, la durabilité d'ensemble de ce procédé peut être considérée comme équivalente à celle de murs traditionnels en béton.

Elle requiert :

L'exécution des travaux normaux d'entretien des façades en béton ;

La réfection des garnitures de mastic extérieures.

1.2.2.3 Mise en œuvre

La mise en œuvre est effectuée par toute entreprise qualifiée ayant suivi une première formation par l'entreprise titulaire suivant les dispositions indiquées au §2.5 du Dossier Technique. Elle nécessite :

La prise en compte, à tous les stades de l'exécution et par l'ensemble des intervenants, des conséquences de la libre dilatation du voile extérieur des panneaux ;

De désolidariser le précadre éventuel de la paroi extérieure en interposant une bande néoprène en périphérie ;

Un contrôle de la vitesse de bétonnage des deux parois qui doit être identique des deux côtés afin d'éviter tout phénomènes de cisaillement de l'isolant et de conserver correctement son positionnement dans le coffrage.

La mise en place de l'isolant devra être particulièrement soignée afin que les plaques d'isolant soient jointives entre elles.

1.2.3 Prescriptions Techniques

1.2.3.1 Conditions de conception

La conception et le calcul du procédé de mur GBE sont à la charge du BET Structures en charge du chantier. Le titulaire prête l'assistance technique nécessaire dans ce cadre en mettant notamment à disposition des acteurs de la construction une liste de bureaux d'études techniques disposant de l'expertise requise pour le dimensionnement des murs GBE en respect des prescriptions techniques du présent Avis.

Le dimensionnement des parois en béton est effectué en tenant compte des spécificités du procédé développées dans le Dossier Technique, sur la base d'une étude de transmission des efforts et de descente de charge de l'ensemble de l'ouvrage.

Les enrobages des armatures de la paroi extérieure doivent respecter les prescriptions de la section 4 de la NF EN 1992-1-1 et son Annexe Nationale en fonction des conditions d'environnement.

Les épingles en acier inoxydable assurant la liaison entre les deux voiles devront être dimensionnées, pour chaque type de panneau, conformément aux prescriptions données dans le § 2.4.2.2.6 du Dossier Technique.

Une distance minimale de 60 cm devra être respectée entre les épingles et les coins d'angle entrant permettant d'éviter la plastification des épingles de liaison en situation normale. Alternativement, si la dernière épingle est située entre 50 et 60 cm de l'angle, il faudra vérifier que la longueur cumulée entre joints des murs, dans des configurations de retour de façade soit inférieure ou égale à 21 m.

Les efforts de vent à prendre en compte pour le dimensionnement des épingles qu'ils sollicitent sont ceux correspondant au vent extrême. Ils devront être déterminés conformément aux prescriptions de la NF EN 1991-1-4 et son Annexe Nationale NF EN 1991-1-4/NA.

Pour les vérifications en phase provisoire (poids propre, charges de construction), on considère que :

- La tenue de la paroi extérieure au jeune âge est assurée par les connecteurs plastiques de type dague/verrou pour un vent de 85 km/h au maximum. Au-delà, il convient de ne pas décoffrer les voiles et d'étayer les banches en conséquence ;
- Les passerelles ne seront pas accrochées au mur avant 7 jours : ce délai doit être respecté. Le dimensionnement de la paroi extérieure devra être effectué en considérant une résistance à la compression du béton $f_{ck}(7) = 20$ MPa.
- Dans le calcul des largeurs de joints, il sera pris en compte une tolérance d'exécution minimale de 5 mm.

Le voile intérieur du procédé doit être dimensionné selon les Eurocodes (NF EN 1992-1-1 et son Annexe Nationale) et selon les dispositions constructives du DTU 23.1 en prenant en compte les charges induites par le parement de façade.

Le voile extérieur du procédé doit être dimensionné selon les Eurocodes (NF EN 1992-1-1 et son Annexe Nationale) et selon les dispositions constructives du DTU 23.1 en prenant en compte les charges dues au poids propre, au vent et au séisme le cas échéant

Pour la paroi extérieure, un ferrailage minimal constitué d'un treillis soudé ST25C correspondant à des sections d'aciers de 2,57 cm²/m dans chaque direction devra être systématiquement mis en place. Ainsi que des aciers autour des ouvertures. Dans les zones où le treillis ST 25C et les aciers autour des ouvertures ne suffisent pas pour contrôler l'ouverture des fissures, un ferrailage complémentaire sera alors requis, conformément au §2 du Dossier Technique.

Les caractéristiques minimales des isolants sont I2-S1-O2-L3 en référence au guide du référentiel ACERMI.

Sur les faces en contact avec l'isolant des deux parois, il convient de considérer un enrobage minimal des armatures correspondant à celui de la classe d'exposition du parement exposé - 5 mm, sans descendre en dessous de celui de la classe d'exposition XC3.

En cas d'épingles de liaison disposées à travers le mur entre deux planchers (ancrage intermédiaire dans le mur intérieur), l'épaisseur de l'isolant et de la paroi intérieure devront être compatibles avec la longueur libre de calcul des épingles (vis-à-vis des phénomènes de dilatation) et avec les conditions d'enrobage et d'ancrage des épingles dans le voile intérieur (enrobage minimum de 5 cm de l'épingle).

En cas d'utilisation du procédé sur une hauteur enterrée supérieure à 1 m, la conception du mur devra être réalisée conformément aux prescriptions du §2.5.2.6 du Dossier Technique.

La distance entre joints de dilatation de l'ouvrage, dans lequel est incorporé le procédé de double mur GBE, devra respecter les prescriptions de la NF EN 1992-1-1 et son Annexe nationale.

1.2.3.2 Utilisation en zone sismique

Les parois intérieures porteuses primaires doivent être conçues conformément au chapitre 5 « Règles particulières pour les bâtiments en béton » de la norme NF EN 1998-1-1.

Les parois extérieures non porteuses ne participent pas au contreventement de l'ouvrage ; elles sont considérées comme des éléments secondaires et doivent être conçus conformément à la NF EN 1998-1 et son Annexe Nationale française, et selon les dispositions indiquées au §2.4.2.2.2 et au §2.4.2.2.3 du Dossier Technique :

- Séisme perpendiculaire au plan de la paroi : Le dimensionnement est réalisé conformément à l'article §4.3.5 de la NF EN 1998-1-1, avec $q=1$. Les épingles de liaison doivent être dimensionnées conformément aux prescriptions de l'article §2.4.2.2.6 du Dossier Technique :
- Sollicitation sismique parallèle au plan de la paroi : Le contreventement est assuré par la paroi elle-même. L'évaluation des sollicitations est obtenue à l'aide de la méthode des éléments finis (modèle 3D), par analyse modale spectrale. Une méthodologie de modélisation est détaillée dans l'Annexe XIII du Dossier Technique.

1.2.3.3 Conditions de mise en œuvre

Le bétonnage des deux parois en béton de type Ultra Twin Procédé GBE de Lafarge France ou équivalent (selon §2.3.1 du Dossier Technique), devra être réalisé conformément aux prescriptions de la norme NF EN 13670 et plus particulièrement suivant les recommandations vis-à-vis de la limitation de la chute libre du béton prévues dans les « Recommandations pour l'emploi des bétons autoplaçants » éditées en janvier 2008 et les prescriptions données au §2.5.1.6 du Dossier Technique.

La hauteur de chute du béton est dans ce sens limitée à 5 m avec l'utilisation du béton ULTRATWIN de la société Lafarge France. Dans le cas d'utilisation d'un béton équivalent respectant les exigences du §2.3.1 du Dossier Technique, des essais de convenance devront être réalisés pour valider une hauteur de chute supérieure à 3 m et inférieure ou égale 5 m. En absence des essais de convenance, la hauteur de chute du béton est limitée à 3 m.

Les contrôles du béton frais livré seront réalisés sur chantier avant sa mise en œuvre conformément au §8 du guide « Recommandations pour l'emploi des bétons autoplaçants (2008) » de l'AFGC.

Les documents à fournir par le titulaire et/ou le BET Structure, sont :

- Les plans de coffrage et de ferrailage ;
- Les plans de calepinage des épingles de liaison ;
- Les plans de calepinage des panneaux d'isolant et des pièces plastiques conformément aux prescriptions des Annexes XIII et XVI du Dossier Technique.

La méthodologie de mise en œuvre du procédé de mur doit comporter un contrôle sur :

- L'implantation (entraxes, distances aux bords) et la bonne orientation des connecteurs plastiques (dagues/verrous et entretoises) avant fermeture des banches ;
- Les dimensions du panneau extérieur ;
- Le respect des conditions d'enrobage des armatures des deux parois ;
- La vitesse de bétonnage des deux parois.

Les menuiseries doivent être fixées sur la paroi intérieure et être conçues pour permettre la mise en place, dans le joint entre dormant et panneaux en béton, d'un joint d'étanchéité continu.

Pour constituer la garniture extérieure des joints de la paroi extérieure, on doit choisir un mastic élastomère à bas module.

Les garnitures de mastic des joints entre murs doivent être mises en place entre des lèvres de joints dépoussiérées, non mouillées et traitées, si nécessaire, avec un primaire prescrit par le fournisseur de mastic.

L'isolant utilisé dans le procédé de mur « Procédé GBE ® » doit faire l'objet d'une certification ACERMI, comme le prévoit le Dossier Technique.

Au droit de la jonction façade-plancher, les prescriptions du paragraphe 2.2 de l'IT 249 doivent être respectées afin d'assurer l'étanchéité aux flammes et aux gaz chauds et d'éviter la propagation du feu aux niveaux supérieurs.

Le relevé d'étanchéité des planchers haut extérieur (par exemple toitures-terrasses) n'est pas admis sur la peau extérieure des murs en acrotère.

Appréciation globale

L'utilisation du procédé dans le domaine d'emploi accepté (cf. paragraphe 1.2.1) est appréciée favorablement.

1.3 Remarques complémentaires du Groupe Spécialisé

Bien qu'elle ne soit pas préjudiciable au fonctionnement de la structure, le GS attire l'attention sur le risque de fissuration probable de la paroi extérieure (notamment pour les faibles épaisseurs) sous l'effet de l'action thermique.

2 Dossier Technique

Issu du dossier établi par le titulaire

2.1 Données commerciales

2.1.1 Coordonnées

Titulaires :	Société GBE	Lafarge France
	50 Rue Albert Thomas	2 avenue du Général de Gaulle
	FR -42300 Roanne	92 148 Clamart Cedex Internet :
	Tél. : 04 77 62 15 38	
	Internet : www.gbe-innovation.fr	www.lafarge.fr

2.2 Principe et domaine d'emploi

2.2.1 Principe

Le procédé GBE® consiste en la réalisation in situ de murs sandwich isolants essentiellement destinés aux façades et pignons de bâtiments. Ces murs assurent une fonction porteuse. Ils peuvent contenir des poutres-voiles, des poutres et des poteaux. Ils sont composés de deux parois en béton armé coulées en place séparée par un isolant. La paroi, ou peau, extérieure est appuyée en partie basse et libre de se dilater par ailleurs.

Le Procédé GBE® est une adaptation des murs en béton banché classiques. Il combine performances techniques et thermiques en présentant tous les avantages d'une isolation thermique par l'extérieur (ITE).

Les murs Procédé GBE® apportent une réponse efficace aux exigences de diminution des consommations d'énergie dans le domaine de la construction.

Les avantages en termes de performances thermiques :

Réduction des ponts thermiques de liaison ;

Adaptabilité aux contraintes du chantier du fait de la réalisation in-situ ;

Contribution au confort d'été dès lors que la masse de béton du voile intérieur n'est pas masquée par des éléments légers ;

Possibilité de mettre en œuvre des épaisseurs d'isolant importantes (jusqu'à 34 cm) et choix d'isolants compatibles ;

Ponts thermiques intégrés relativement faibles grâce au mode de fixation ponctuel du voile extérieur.

L'épaisseur minimale du système est de 29 cm.

Le procédé est constitué en partant de l'extérieur :

- D'une paroi extérieure, ou peau, en béton armé d'une épaisseur supérieure ou égale à 10 cm, destinée à rester apparente, éventuellement matricée, ou revêtue. Cette paroi est appuyée en partie basse sur un élément lui servant d'appui. Elle est rattachée à la structure intérieure porteuse par des épingles en acier inoxydable qui ne gênent pas les déformations thermiques. Cette paroi peut avoir les dimensions maximales suivantes : 28 m de hauteur, largeur limitée par la longueur entre joints de dilatation (25 à 50 m) selon les Eurocodes. Cette paroi n'est pas structurelle.
- D'une isolation thermique intégrée au mur avant le coulage du béton. L'isolant sert également de coffrage perdu des deux parois en béton. L'épaisseur de l'isolant est comprise entre 5 et 34 cm.

L'intégration de l'isolant dans le procédé de mur coulé en place (maintien de l'isolant entre les deux banches) est réalisée à l'aide d'un outillage spécifique faisant l'objet du brevet n° 2 956 871. L'outillage est composé d'un système de dague/verrou en matière plastique permettant le positionnement des panneaux d'isolant (par rapport aux banches : calibrage de l'épaisseur des voiles intérieurs et extérieurs) traversant l'isolant ; ainsi que d'un système d'assemblage des banches comportant des entretoises tubulaires en matière plastique qui traversent également l'isolant et qui permettent de maintenir l'écartement entre les deux. Ces pièces plastiques viennent en appui sur les faces internes des deux banches. Les pièces plastiques relient les deux voiles, elles sont conçues pour assurer la liaison (transmission d'effort) entre la paroi intérieure et la paroi extérieure en phase de construction.

- D'une paroi intérieure en béton armé. C'est une paroi dont les éléments structurels de 14 cm minimum sont solidaires du reste de la structure du bâtiment. Elle assure une fonction porteuse et participe à la stabilité de l'ouvrage. Ce voile est dimensionné selon les règles habituelles, en prenant en plus en compte les charges amenées par la peau extérieure.

La mise en œuvre est proche de celle d'un mur en béton banché classique rentrant dans le champ du DTU 23.1 (coffrage, etc.) avec des dispositions complémentaires liées à l'intégration d'un isolant.

Les deux parois en béton sont coulées en place simultanément en béton autoplaçant en s'assurant de l'équilibrage de la montée du béton de part et d'autre de l'isolant.

La paroi extérieure appuyée en partie basse est reliée à la paroi intérieure par des épingles de liaison permettant la libre dilatation. Ces épingles qui traversent l'isolant sont en acier inoxydable d'armature pour béton armé. Ces épingles permettent la reprise de l'ensemble des charges appliquées perpendiculairement à la paroi extérieure (séisme, vent ...).

Le système est dimensionné pour que ces épingles restent dans le domaine élastique en utilisation normale.

Les typologies de plancher associées à ce procédé de mur peuvent être des dalles pleines coulées en place, des planchers à prédalles ou des dalles alvéolées (Figure 39 – Annexe XVII).

La liaison horizontale en pied des voiles intérieurs et extérieurs est une reprise de bétonnage réalisée avec des armatures en attentes : il n'y a pas de joint horizontal à ce niveau.

Les menuiseries extérieures sont rapportées en œuvre. Un précadre métallique peut être incorporé dans le coffrage avant le bétonnage.

L'intégration des menuiseries est réalisée de manière à ne transmettre aucun effort entre les deux parois.

Finitions :

Extérieur : parements extérieurs en béton apparent ou tout type de revêtement rapporté sur béton ;

Intérieur : finitions classiques sur béton.

2.2.2 Domaine d'emploi

Le procédé GBE® est destiné à la réalisation de murs pour tout type de bâtiments à usage courant tel qu'Établissements Recevant du Public (ERP), bâtiments tertiaires, de commerces, industriels et d'habitation, situés en zone sismique 1 à 5 et sans limitation de hauteur (sauf ITGH), en France Métropolitaine et DROM.

2.3 Matériaux

2.3.1 Béton

Pour les parois intérieures et extérieures :

Le béton employé doit être autoplaçant afin d'assurer le coulage simultané des deux parois et la bonne tenue de l'isolant lors du coulage du béton.

Le béton utilisé pour le Procédé GBE® est de type Ultra Twin Procédé GBE de Lafarge France ou équivalent. Il est de classe C25/30 minimum (résistance caractéristique minimale à 28 jours de 25 MPa) conforme à la norme NF EN 206/CN et de type BPS (Béton à Propriétés Spécifiées).

Les propriétés du béton autoplaçant frais sont :

Classe d'étalement SF2 ou SF3 (étalement au cône d'Abrams, essai selon l'EN 12350-8), la consistance est obtenue par l'ajout d'un superplastifiant haut réducteur d'eau ;

Classe d'aptitude à l'écoulement PL2 (taux de remplissage de la boîte en L $\geq 0,80$ avec 3 armatures, essai selon l'EN 12350-10) ;

Classe de viscosité apparente VF1, (essai selon l'EN 12350-9) ;

Classe de résistance à la ségrégation SR1 (essai selon l'EN 12350-11).

Le diamètre maximal des granulats D_{max} doit permettre le remplissage de la peau extérieure comportant des armatures, il est compris entre 8 et 16 mm.

Dans le cas d'utilisation d'un autre béton que l'Ultra Twin Procédé GBE® de Lafarge France, outre les essais nécessaires pour qualifier ses propriétés à l'état frais indiquées ci-dessus, des essais spécifiques en vraie grandeur peuvent s'avérer nécessaires : coulage d'un prototype de mur GBE afin de vérifier que le béton permet le remplissage correct de la paroi extérieure et que l'aspect du parement satisfait aux attentes.

La montée du béton dans le coffrage doit se faire à la même vitesse de part et d'autre de l'isolant.

2.3.2 Acier d'armature

Le ferrailage des parois est réalisé avec des treillis soudés et des barres HA de nuance B500, classe de ductilité selon les besoins du projet et conformes à la norme NF EN 10080. Le calage des armatures dans les voiles est assuré par des cales à béton côté banche et côté isolant.

2.3.3 Acier de liaison inoxydable

Les deux parois en béton constituant le mur GBE sont reliées entre-elles à travers l'isolant thermique par des épingles en acier inoxydable, HA ou lisse, de limite élastique 500 MPa au minimum, avec un ancrage ad-hoc.

Les épingles de liaison ont pour but de reprendre les efforts de traction et de compression qui résultent des efforts perpendiculaires au plan de la paroi extérieure tout en laissant les déplacements libres dans le plan du voile. Ces épingles peuvent être en « U » ou en « L » (voir Figure 3 au § 2.4.2.2.6).

Les types d'aciers inoxydables recommandés et utilisables pour le procédé sont les suivants avec leurs nuances de référence selon la NF EN 10088-1 : 1.4301, 1.4401, 1.4062, 1.4362, 1.4462. Le module d'élasticité de ces nuances est égal à 200 GPa à 20°C. En zone d'attaques de gel/dégel (montagne) et en présence de sel marin (front de mer) la nuance inox à retenir est 1.4462.

Le dimensionnement de ces épingles consiste à en déterminer la longueur libre pour que les déformations thermiques de la paroi extérieure n'engendrent pas leur plastification ainsi que la section d'acier nécessaire pour reprendre les efforts hors plan.

Le diamètre, la longueur libre et l'espacement sont déterminés dans la section 2.4.2.2.6 de ce Dossier Technique justifiant le comportement structurel.

2.3.4 Pièces plastiques

Un système breveté de calage de l'isolant et d'assemblage des banches permet la mise en place de l'isolant dans les coffrages et la réalisation des murs sandwichs Procédé GBE®.

L'outillage est composé :

- a. D'un système de positionnement des panneaux d'isolant (par rapport aux banches : calibrage de l'épaisseur des voiles intérieures et extérieures) en matière plastique (polypropylène) traversant l'isolant, comportant deux pièces (Annexe XV - Figure 20) : une dague (tige rainurée avec organe de préhension) et un verrou (manchon tubulaire avec crochet orientable), tous les deux composés de butées d'appui de part et d'autre de l'isolant sous la forme d'un disque. Afin d'éviter l'encombrement du ferrailage de la paroi intérieure, la tige peut être tournée afin d'orienter le crochet du verrou pour lui permettre de traverser le ferrailage.

L'accrochage provisoire de l'isolant au ferrailage est réalisé à l'aide du crochet de verrou alors situé entre le ferrailage et la face interne de la banche.

La densité de tiges plastiques assurant le maintien de l'isolant en phase de coulage est de 2 tiges/m² au minimum. La répartition des dagues-verrous se fait avec un minimum de 4 par panneau d'isolant, au voisinage des angles, avec une distance de 10 à 25 cm des bords de panneaux, et en assurant une distance maxi de 1 m entre chaque dague (chaque dague est à 1 m maximum de deux autres dagues).

La matière utilisée est le polypropylène homopolymère PP-TD-20 avec 20 % d'addition de talc qui augmente le module d'élasticité, de densité 0,91 g/cm³, de module E= 2,9 GPa et de résistance en traction de 15 MPa.

- b. D'un système d'assemblage des banches comportant des entretoises tubulaires (Annexe XV - Figure 21) en matière plastique (polyamide) qui traversent également l'isolant. Ces entretoises sont munies extérieurement d'éléments tranchants amovibles (dents, hélice) adaptés pour découper le panneau d'isolant par un mouvement de rotation et permettent de maintenir l'écartement entre les deux banches. Les tiges de serrage des banches passent à l'intérieur du tube de l'entretoise. Les entretoises peuvent être équipées d'embouts réutilisables pouvant être retirés à l'aide d'une clé prévue à cet effet.

Ces entretoises auto-foreuses sont conçues pour :

Empêcher le soulèvement de l'isolant au coulage.

Reprendre les efforts de compression lors du serrage des panneaux de coffrage.

Reprendre les efforts de compression lors de la mise en place des passerelles (les embouts larges diffusent les efforts de compression et protègent ainsi le parement béton extérieur). En effet, il est prévu d'utiliser des passerelles de chantier en appui sur le mur GBE. Le montage des passerelles se fait de la même manière que pour un mur standard. Les embouts ne sont pas retirés aux endroits où les entretoises sont destinées à recevoir les passerelles de sécurité.

Ces pièces plastiques viennent en appui sur les faces internes des deux banches : elles possèdent une longueur égale à l'épaisseur du mur à réaliser.

La matière est en polyamide 6 avec densité 1,1 g/cm³, de module E= 7 GPa et de résistance en traction de 30 MPa.

Les pièces plastiques sont fabriquées par un industriel certifié ISO 9001 : V2000.

2.3.5 Isolant

Le maintien des performances thermiques suppose l'utilisation d'isolants dont les performances ne sont pas dégradées par le contact avec du béton frais au moment de la mise en œuvre.

La nature et les épaisseurs de l'isolant dépendent de la performance recherchée, déterminée par l'étude thermique. Les isolants utilisés se présentent sous la forme de panneaux rigides. Les dimensions (longueur x largeur) des panneaux d'isolant peuvent varier. Les règles données en Annexe XVI pour l'implantation des pièces plastiques de positionnement des panneaux d'isolant sont à respecter.

Il est recommandé d'utiliser des panneaux de grandes dimensions (par exemple 2500 mm x 1200 mm).

Les dimensions maximales des panneaux d'isolant sont : largeur maxi de 1300 mm et hauteur maxi de 3000 mm. La plus petite dimension doit être supérieure à 200 mm.

Les règles de positionnement des dagues sur les panneaux d'isolant sont données à l'Annexe XVI.

En fonction de la hauteur des panneaux d'isolant, le nombre minimal de dague par panneau peut être :

4 à 5 dagues pour des panneaux jusqu'à 1300 mm de hauteur

5 à 8 dagues pour des panneaux entre 1300 mm et 2000 mm de hauteur

6 à 8 dagues pour des panneaux entre 2000 mm et 2300 mm de hauteur

8 dagues pour des panneaux de plus de 2300 mm de hauteur (possible si la hauteur de coulage du béton est inférieure à 3 m).

Les isolants utilisés doivent être certifiés ACERMI. A défaut, les performances thermiques des murs Procédé GBE® doivent être calculées en majorant de 15 % les valeurs déclarées de la conductivité thermique de ces isolants.

Les caractéristiques minimales des isolants utilisés sont I2-S1-O2-L3. Ce profil d'usage est certifié par l'ACERMI. A défaut de certification du profil d'usage ISOL, les caractéristiques de l'isolant devront être au moins équivalentes pour chacun des 4 critères (propriétés mécaniques en compression, comportement aux mouvements différentiels, comportement à l'eau, propriétés mécaniques utiles en cohésion et flexion).

Les isolants peuvent être des plaques en polystyrène expansé, polystyrène extrudé, polyuréthane ou tout autre isolant pouvant justifier du profil d'usage I2S1O2L3 ou équivalent. Les isolants certifiés ACERMI répondent aux normes suivantes :

Polystyrène expansé : NF EN 13163

Polystyrène extrudé : NF EN 13164

Polyuréthane : NF EN 13165

Laine minérale de type laine de roche (respect de l'IT 249 uniquement) : NF EN 13162.

Les dispositions permettant le respect de l'IT249, notamment au pourtour des baies, sont décrites dans l'appréciation de laboratoire CSTB n° AL 16-176 V2.

La compressibilité de l'isolant doit être suffisante suivant la pression du béton frais. A titre d'exemple, pour une hauteur de coulage de 2,50 m, la résistance à la compression de l'isolant doit être d'au moins 120 kPa.

L'épaisseur de l'isolant peut être comprise entre 5 et 34 cm.

2.4 Conception et dimensionnement

2.4.1 Principe de conception

2.4.1.1 Description du concept structural

Les murs GBE® peuvent être conçus comme éléments porteurs. Dans ce cas, la stabilité est assurée uniquement par la paroi intérieure et la paroi extérieure sert d'habillage.

Les murs GBE® peuvent également être non-porteurs et servir de bardage. Dans ce cas, ils ne participent pas à la stabilité du bâtiment (contreventement, fonction porteuse, etc.).

La stabilité propre du voile de béton extérieur des murs sandwich est normalement assurée en appliquant les prescriptions techniques visant les épingles de liaison

Pour chaque projet utilisant le procédé GBE, les recommandations et calculs de dimensionnement suivants devront être adoptés :

Dimensionnement de la structure intérieure :

- Calcul comme indiqué au §2.4.2.1, pour l'ensemble des cas de charge et combinaisons adéquats.

Dimensionnement de la paroi extérieure en béton armé :

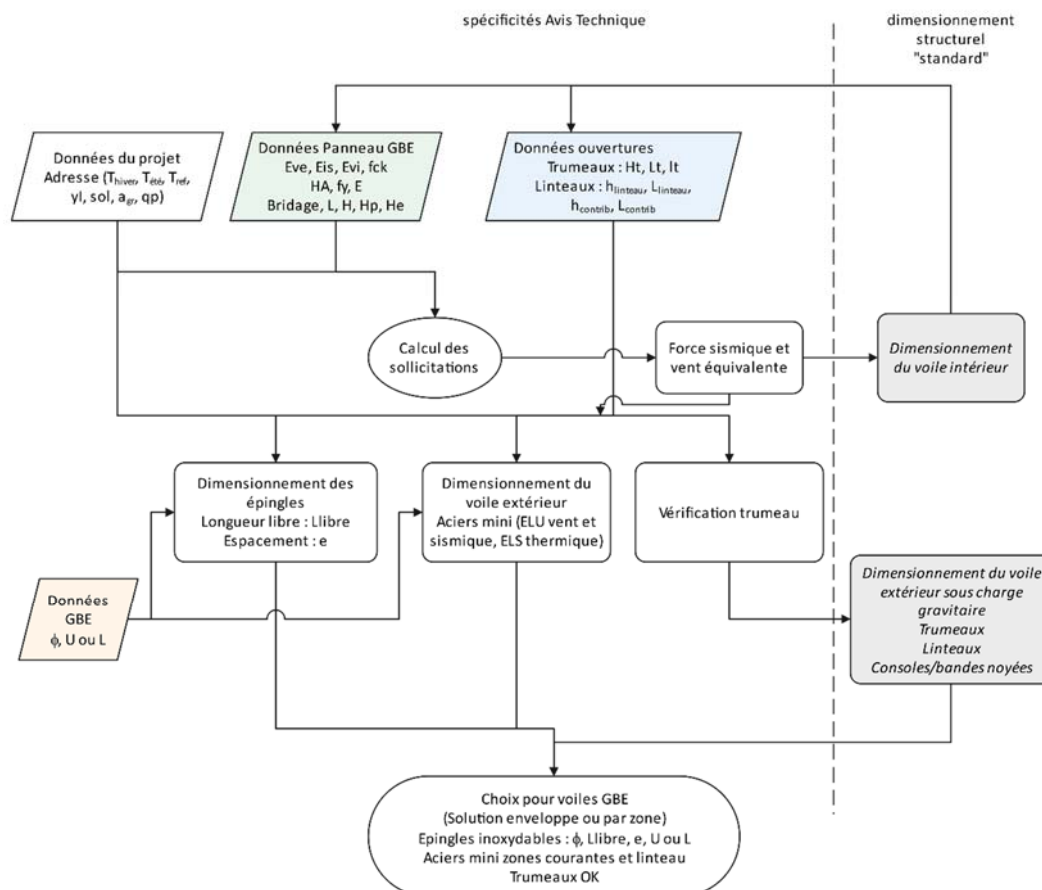
- Calcul sous charge gravitaire comme indiqué au §2.4.2.2.1 ;
- Calcul sous charges sismiques dans le plan et hors plan comme indiqué au §2.4.2.2.2 et §2.4.2.2.3 ;
- Calcul sous charge de vent comme indiqué au §2.4.2.2.2.2 ;
- Calcul sous charge provisoire en phase de construction comme indiqué au §2.4.2.2.5 ;
- Mise en place à minima d'un ferrailage courant constitué d'un treillis soudé ST25C ou équivalent et mise en place d'un ferrailage majoré comme indiqué au §2.4.2.2.7.

Dimensionnement des épingles de liaison

- Calcul comme indiqué au §2.4.2.2.6.

L'Annexe I présente la méthodologie de dimensionnement afin de détailler de manière synthétique les règles de calcul à utiliser pour le procédé GBE®.

Figure 1 – Principe général de dimensionnement



2.4.1.2 Actions

2.4.1.2.1 Charges gravitaires

Il convient de prendre en compte le poids propre dans l'étude du mur GBE®. Ainsi que les charges permanentes et d'exploitation amenées par la structure pour le voile intérieur

2.4.1.2.2 Vent

Il convient de vérifier les conséquences des actions du vent sur la façade extérieure, et la transmission de ces actions vers la structure intérieure à travers les différents connecteurs et l'isolant. La pression équivalente du vent s'exerçant sur les parois est calculée selon l'Eurocode 1 partie 4 (NF EN 1991-1-4). Il convient de calculer les effets de flexion de la paroi extérieure sous la pression du vent hors plan. La façade se comporte comme une poutre continue en appui au niveau des lignes d'épingles. Ce calcul permet de déterminer une section de ferrailage verticale. Il n'y a qu'un lit d'acier centré sur l'épaisseur de la paroi. La paroi est continue sur la hauteur, encastrée de part et d'autre de la portée. Le moment sur appui, critique dans ces conditions, doit être étudié. Le calcul est décrit au §2.4.2.2.2.

2.4.1.2.3 Séisme

En cas d'exigences parasismiques :

Il convient de réaliser une modélisation numérique et un calcul aux éléments finis pour définir le ferrailage de la façade sous sollicitations sismiques dans son plan (analyse modale spectrale). Les déplacements hors plan sont bloqués au niveau des épingles de liaison. Les façades sont bloquées en pied au niveau des fondations.

Il convient de calculer les effets de flexion de la paroi extérieure sous sollicitation sismique hors plan. La façade se comporte comme une poutre continue en appui au niveau des planchers. Ce calcul permet de déterminer une section de ferrailage vertical. Il n'y a qu'un lit d'acier centré sur l'épaisseur de la paroi. La paroi est continue sur la hauteur, encastrée de part et d'autre de la portée. Le moment sur appui, critique dans ces conditions, doit être étudié. Le calcul est décrit au §2.4.2.2.2.

Les épingles en inox doivent être dimensionnées pour les efforts enveloppe de séisme hors plan et du vent afin d'assurer la connexion du voile extérieur avec la structure intérieure. Ce dimensionnement est décrit au §2.4.2.2.2.

2.4.1.2.4 Thermique

Les variations de température entraînent une déformation thermique différentielle entre le voile extérieur et le mur intérieur. Il convient de ne pas gêner la libre dilatation et contraction du voile extérieur, notamment au niveau des ouvertures. Les déformations thermiques peuvent cependant être gênées par les retours aux angles du bâtiment et le sont toujours à la base du voile extérieur. Des armatures minimales définies par le DTU 23.1 ou les Eurocodes et décrites au §2.4.2.2.7 et dans l'Annexe XI doivent être mises en œuvre afin de contrôler la fissuration du voile sous ces sollicitations thermiques.

Le dimensionnement des épingles en acier inoxydable est effectué avec le but que le déplacement de la paroi lié aux sollicitations thermiques n'entraîne pas leur plastification. Le calcul de longueur libre minimale est décrit au §2.4.2.2.6.

L'Annexe XIV indique l'ouverture de fissures théorique liée aux sollicitations thermiques en fonction de la température d'un voile extérieur plein, dans le cas d'une armature ST25C.

2.4.1.2.5 Choc

Au vu de l'épaisseur minimale des parois en béton et par analogie aux ouvrages traditionnels, le procédé GBE® est considéré comme satisfaisant vis-à-vis des exigences de résistance aux chocs définies dans la norme expérimentale P 08-302 (mur en rez-de-chaussée par exemple).

2.4.1.2.6 Phase de construction

Pour assurer la stabilité en phase chantier, en complément des autres dispositions constructives, les recommandations sont les suivantes :

Le béton doit permettre d'assurer une résistance en compression de calcul de 13 MPa au moment de la pose des passerelles de l'étage supérieur (résistance caractéristique de 20 MPa) ;

Pour une charge d'appui des jambes de force des passerelles de chantier de 5 kN/m, un taux de vide (ouvertures) de 50 % et une hauteur inférieure ou égale à 180 cm entre les entretoises situées immédiatement en-dessous et au-dessus des barres d'appui des passerelles, l'équivalent d'un treillis ST25C (soit 2,57 cm²/m par direction) doit être positionné à la fibre moyenne de la paroi extérieure.

La liaison entre les parois est assurée par les connecteurs plastiques et entretoises en phase provisoire. Ces liaisons mécaniques permettent d'assurer une progression sécuritaire lors de la construction du bâtiment. La justification de cette connexion est décrite au §2.4.2.2.5.

De plus, lors des phases provisoires avant le coulage du plancher directement supérieur à l'étage de réalisation des murs, ceux-ci sont soumis aux actions du vent. Il convient donc de stabiliser le voile intérieur du mur au besoin.

2.4.2 Conception des parois

2.4.2.1 Paroi intérieure

La structure principale intérieure est une structure en béton armé traditionnelle et les dispositions de l'Eurocode 2 partie 1.1 (NF EN 1992-1-1 + Annexes Nationales françaises) et de l'Eurocode 8 partie 1 (NF EN 1998-1 + Annexes Nationales françaises) sont applicables.

Les sollicitations hors plan (vent, séisme) appliquées aux parois extérieures sont directement transmises à la structure interne par les différents types de connecteurs et sont à prendre en compte pour le dimensionnement de la structure interne.

La masse globale de la paroi externe, qui est liée au bâtiment, est à prendre en compte dans la direction hors plan des parois pour le dimensionnement de la structure.

2.4.2.2 Paroi extérieure

La paroi extérieure est un mur en béton armé traditionnel ancré en pied et les dispositions de l’Eurocode 2 partie 1.1 (NF EN 1992-1-1 + Annexes Nationales françaises) et de l’Eurocode 8 partie 1 (NF EN 1998-1 + Annexes Nationales françaises) sont applicables. Les dispositions du DTU 23.1 sont applicables pour les voiles de 15 cm et plus (12 cm et plus si non exposés aux intempéries).

La paroi extérieure doit être dimensionnée en tenant compte des sollicitations dues aux chargements suivants : poids propre, séisme et vent, ainsi que les sollicitations liées à la dilatation thermique due à la présence de l’isolant.

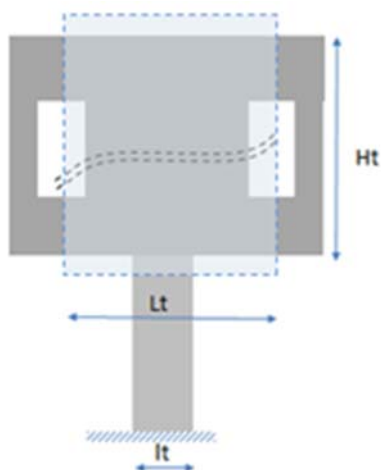
Les épingles doivent être dimensionnées pour absorber, sans les limiter, les déplacements relatifs de la paroi extérieure par rapport à la paroi intérieure.

2.4.2.2.1 Sous charges verticales

Le dimensionnement de la paroi extérieure est réalisé selon les Eurocode au niveau des ouvertures. Il convient de prendre en compte le poids propre dans l’étude de la paroi extérieure. Une attention particulière doit être portée aux niveaux inférieurs où les poteaux (trumeaux) de façade extérieure sont particulièrement chargés. Le non-flambement hors plan de ces éléments est à vérifier.

Le tableau suivant mentionne la hauteur maximale du voile extérieur en fonction de la largeur des trumeaux, de la largeur tributaire (espacement des trumeaux) et de la hauteur libre de la paroi extérieure entre les épingles assurant la retenue latérale des trumeaux. Pour la vérification de la stabilité de la paroi extérieure (vis-à-vis des charges verticales) entre lignes d’épingles, il convient de retenir une longueur de flambement égale à la hauteur libre entre lignes d’épingles.

Figure 2 - Présence des trumeaux dans le dimensionnement de la paroi extérieure.



- l_t : Largeur du trumeau
- L_t : Largeur tributaire considérée pour la charge gravitaire
- H_t : Hauteur de voile maximal au-dessus du trumeau
- H_e : Hauteur libre entre épingles au niveau du trumeau (non visible, maximum 6 m)

La longueur de flambement est prise égale à $1,0 \times H_e$ en base de voile (cas défavorable ne supposant aucune raideur liée aux ancrages ou continuité)

Pour un dimensionnement spécifique, les calculs de flambement peuvent être réalisés suivant plusieurs méthodes : flexion composée, rigidité nominale, courbure nominale et méthode générale. Il revient au bureau d’étude en charge du dimensionnement de la paroi extérieure de réaliser les calculs adéquats en fonction des caractéristiques de chaque projet.

Tableau 1 - Hauteur maximale du voile extérieur en fonction de la largeur des trumeaux

largeur l_t (cm)	30					
Hauteur libre H_e (m)	3	4	5	3	4	5
Largeur tributaire L_t (m)	3	3	3	5	5	5
Épaisseur E_{ve} (cm)	10	12	15	10	12	15
hauteur max H_t (m)	18	16	16	11	9	9
largeur l_t (cm)	50					
Hauteur libre H_e (m)	3	4	5	3	4	5
Largeur tributaire L_t (m)	3	3	3	5	5	5
Épaisseur E_{ve} (cm)	10	12	15	10	12	15
hauteur max H_t (m)	28	27	9	18	16	16
largeur l_t (cm)	100					
Hauteur libre H_e (m)	3	4	5	3	4	5
Largeur tributaire L_t (m)	3	3	3	5	5	5
Épaisseur E_{ve} (cm)	10	12	15	10	12	15
hauteur max H_t (m)	28	28	28	28	28	28

2.4.2.2.2 Sous charges horizontales hors plan

Vis-à-vis de la composante hors plan des façades (séisme et vent), les efforts sont transmis vers la structure interne à travers des épingles en acier et par l'isolant. Le dimensionnement des épingles est présenté dans la section 2.4.2.2.6. Entre lignes d'épingles la paroi est dimensionnée pour résister à la flexion induite par une sollicitation de vent et sismique le cas échéant.

La force enveloppe des actions du séisme et du vent dans la direction hors plan est également utilisée pour le dimensionnement des épingles inoxydables dans la section §2.4.2.2.6. L'évaluation des sollicitations peut être réalisée analytiquement par des calculs locaux de flexion de panneaux en béton armé sur deux appuis (planchers haut et bas à chaque étage, lignes d'épingles de liaison)

Dans le cas de la flexion de la paroi extérieure sollicitée hors plan, l'aire d'acier est calculée en fonction de la sollicitation enveloppe, l'épaisseur de la paroi et la hauteur entre les épingles selon les équations suivantes :

Le calcul du moment sollicitant s'effectue de la manière suivante :

$$M = \frac{F_{ah}L^2}{10}$$

Où :

F_{ah} est pris comme la valeur maxi des sollicitations sismiques ou de vent = $\text{Max} (F_{ah,s} , F_{ah,v})$;

L est la distance verticale entre 2 rangées d'épingles ;

Le moment à considérer pour le dimensionnement est l'enveloppe des sollicitations calculées de vent et de séisme.

On peut ainsi calculer la section d'acier nécessaire :

$$A_a = \frac{M}{(\sigma_{ay} \times z_e)}$$

Avec σ_{ay} la contrainte limite de calcul de l'acier en MPa et z_e , la hauteur utile en mm (soit $0,9 \times$ épaisseur voile extérieur / 2).

La contrainte limite de calcul de l'acier à utiliser dans les calculs devra être égale à :

$$\sigma_{ay} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$$

Où :

f_{yk} la résistance caractéristique de l'acier ;

γ_s , coefficient partiel de sécurité : situation sismique $\gamma_s = 1$ et situation normale (vent) $\gamma_s = 1,15$.

A titre indicatif, les valeurs du moment sollicitant et de la section d'acier nécessaire en fonction des configurations des projets (enveloppe des forces de vent et de séisme, épaisseur de la paroi extérieure, distance entre épingles) sont présentées respectivement dans les Annexes III et IV.

2.4.2.2.2.1 Action du vent

Un calcul de pression de vent $F_{ah,v}$ est réalisé d'après l'Eurocode 1 partie 4 (NF EN 1991-1-4).

La prise en compte de l'action du vent dépend de l'implantation et des dimensions de chaque projet.

2.4.2.2.2.2 Action sismique

Dans la direction hors plan aux façades, la paroi extérieure est en interaction complète avec le bâtiment dans son ensemble. Les valeurs d'accélération à considérer ne peuvent pas être celles issues du modèle numérique utilisé pour l'étude du comportement dans le plan de la paroi externe. Elles sont issues des dispositions de l'article 4.3.5 de l'Eurocode 8 correspondant aux éléments non-structuraux.

Pour le cas général l'expression analytique de la force sismique $F_{ah,s}$ tirée de la relation 4.24 de la NF EN 1998-1, section §4.3.5 s'exprime par (Cf Annexe I) :

$$F_{ahs} = CS \times m_{elem} \times g$$

Avec :

m_{elem} masse de la paroi extérieure (ou masse surfacique pour pression équivalente = $\rho_b \times$ épaisseur)

$$CS = \frac{\gamma_I a_{gR} S}{g} \left[\frac{3 \left(1 + \frac{z}{H} \right)}{1 + \left(1 - \frac{T_a}{T_1} \right)^2} - 0.5 \right] \times \frac{\gamma_a}{q_a}$$

Les efforts sont maximisés pour $q_a = 1$ (coefficient de comportement) et $\frac{T_a}{T_1} = 1$

Le coefficient d'importance de l'élément vaut $\gamma_a = 1$

La relation est alors simplifiée (cas conservateur) par :

$$CS = 0,56 \times \gamma_I a_{gR} S$$

Les paramètres restant à considérer sont :

- La zone de sismicité (et donc l'accélération de site a_{gR}) ;
- Le coefficient d'importance attribué à la catégorie d'importance de bâtiment, γ_I ;
- Le paramètre de sol, S ;

L'épaisseur de la paroi.

Les valeurs de l'Annexe II sont données pour toutes les zones sismiques, tous les coefficients d'importance de bâtiment, tous les paramètres des sols et des épaisseurs de paroi variant généralement entre 10 et 15 cm.

Dans les tableaux ci-après (Tableau 2) sont indiquées les valeurs du coefficient sismique CS par lequel multiplier le poids d'un élément non structural pour obtenir la force sismique horizontale appliquée à un élément de façade. Soit :

Tableau 2 - Valeurs de coefficient sismique (en considérant $\frac{z}{H} = 1$ et $\frac{T_a}{T_1} = 1$)

Catégorie d'importance du bâtiment : II					
Zone sismique	Classe de sol				
	A	B	C	D	E
3	0,62	0,83	0,92	0,99	1,11
4	0,90	1,21	1,34	1,43	1,61
5	1,68	2,02	1,93	2,27	2,35

Catégorie d'importance du bâtiment : III					
Zone sismique	Classe de sol				
	A	B	C	D	E
2	0,47	0,64	0,71	0,75	0,85
3	0,74	1,00	1,11	1,18	1,33
4	1,08	1,45	1,61	1,72	1,94
5	2,02	2,42	2,32	2,72	2,82

Catégorie d'importance du bâtiment : IV					
Zone sismique	Classe de sol				
	A	B	C	D	E
2	0,55	0,74	0,82	0,88	0,99
3	0,86	1,16	1,29	1,38	1,55
4	1,25	1,69	1,88	2,01	2,26
5	2,35	2,82	2,70	3,18	3,29

2.4.2.2.3 Sous charges horizontales dans le plan

Vis-à-vis des sollicitations dans le plan de la paroi externe, le contreventement est assuré par la paroi elle-même, avec descente de charge jusqu'aux fondations (ou appui intermédiaire tel qu'un corbeau, une bande noyée ou un balcon), en tenant compte des interactions entre les différentes façades (zones de retour d'angle).

L'évaluation des sollicitations peut être obtenue à l'aide de la méthode des éléments finis (représentation tridimensionnelle de l'ensemble des façades composant la paroi externe), par analyse modale spectrale. Le modèle se limite uniquement à la représentation de la paroi externe ; les structures internes et les tirants sont remplacés par le blocage des déplacements normaux au plan de chaque façade.

La modélisation est réalisée de la manière suivante :

Les façades modélisées sont constituées d'éléments type coque ;

Les mailles sont de type quadrangle avec une dimension de l'ordre de 50 cm ;

Les façades sont encastées en pied au niveau des fondations ;

Les déplacements hors plan sont bloqués au niveau de chaque ligne d'épingles afin de modéliser la connexion avec la structure intérieure.

La suite de la conception est classique selon les Eurocodes, comme pour toute autre structure en béton armé : discrétisation de la paroi par des éléments finis coque ou poutre, calcul des sollicitations (analyse modale spectrale, combinaison CQC des modes) et calcul du ferrailage théorique.

Dans le cas de façades avec recouvrement vertical de la peau extérieure, l'entrechoquement de deux parois adjacentes doit être évité sous situation d'actions sismiques. Les joints entre panneaux doivent être suffisants. Cette condition est satisfaite lorsque le joint entre deux panneaux a une valeur au moins égale au double du déplacement de la paroi dû à l'effort sismique ; cela dans l'hypothèse sécuritaire où l'oscillation de deux peaux extérieures adjacentes serait en opposition de phase.

2.4.2.2.4 Cas particulier du démarrage en étage

Il est possible que le parement ne repose pas sur la fondation proprement dite. Dans ce cas, l'appui du parement se fait sur des plots béton, des bandes noyées ou des balcons ancrés dans le mur structural. La paroi extérieure est dimensionnée de manière similaire en considérant un encastrement en pied au niveau des plots en béton ou des bandes noyées. L'armature de la paroi extérieure est dimensionnée de manière à reprendre les efforts de flexion entre les points d'appui selon les exigences de la NF EN 1992-1.

2.4.2.2.5 En phase de construction

Pour assurer la stabilité en phase chantier, en complément des autres dispositions constructives, les recommandations sont les suivantes.

Au jeune âge :

- La stabilité de la paroi extérieure est assurée notamment par l'utilisation des connecteurs plastiques qui permettent d'assurer l'accrochage de la paroi extérieure au mur intérieur et ainsi de résister aux efforts hors plan avant la liaison effective par les épingles en acier inoxydable. La résistance aux efforts dus au vent est assurée après décoffrage pour un vent de 85 km/h (pression d'ensemble de 600 Pa).

Lors de la pose des passerelles du niveau supérieur :

- Le béton doit permettre d'assurer une résistance à la compression de calcul de 13 MPa au moment de la pose des passerelles de l'étage supérieur ;
- L'équivalent d'un treillis ST25C (soit 2,57 cm²/m par direction) doit être positionné à la fibre moyenne de la paroi extérieure ; cas d'une charge d'appui des jambes de force des passerelles de chantier de 5 kN/m, un taux de vide (ouvertures) de 50 % et une hauteur inférieure ou égale à 180 cm entre les entretoises situées immédiatement en-dessous et au-dessus des barres d'appui des passerelles. Une justification est jointe en Annexe V qui détaille la façon dont les charges de chantier (poids de passerelles) sont évaluées et puis appliquées sur les parois. L'intégrité du voile extérieur est assurée en phase provisoire par la liaison créée par les entretoises plastiques.

2.4.2.2.6 Dimensionnement des épingles

Les épingles en acier ont pour but de reprendre les efforts de traction et de compression qui s'appliquent sur la paroi externe. Le dimensionnement optimal consiste alors à les rendre insensibles à d'autres chargements, notamment les mouvements d'origine thermiques. Afin de se prémunir de tout risque de plastification de ces épingles sous ces sollicitations, il faut les rendre les plus souples possible vis-à-vis des mouvements transversaux (verticaux et horizontaux) tout en assurant que la force de compression dans l'épingle n'entraîne pas de flambement.

Les épingles de liaison sont mises en place à espacements réguliers sur la hauteur de la paroi. Leur géométrie peut être en U avec ancrage dans le voile intérieur ou en L avec ancrage horizontal dans le plancher tel que montré à la Figure 3. Il est à noter que l'utilisation d'épingle en U est plus facile lors de la mise en œuvre et offre une plus grande marge de manœuvre dans l'espacement vertical des lignes d'épingles.

L'utilisation d'épingles en L impose que les épingles soient mises en œuvre au niveau des planchers béton.

Les extrémités des épingles doivent être convenablement ancrées dans le béton avec une longueur droite sur au moins 3 fois le diamètre avant le début de la courbure (notamment pour l'ancrage dans le mur intérieur avec manchon d'isolation complémentaire dans le cas d'épingles en U).

Les lignes d'épingles devront donc être distribuées comme suit :

La hauteur entre les épingles : pour les épingles en U la hauteur peut varier entre 0,5 et 6 m tandis que pour les épingles en L la hauteur entre les épingles sera donnée par la hauteur entre les étages (maximum 6 m). L'attention est attirée sur le fait que des épingles en U ne sont possibles que si la longueur libre requise et calculée selon le §2.4.2.2.6.1 ci-après est inférieure à :

$$L < e_{iso} + e_{int} - 50 - 3\phi$$

- e_{iso} : épaisseur de l'isolant
- e_{int} : épaisseur du voile intérieur du double mur
- 50 mm : enrobage minimum de l'épingle côté intérieur
- 3ϕ : dimension permettant un ancrage correct de l'épingle
- Le diamètre des épingles peut varier entre ϕ 4 mm et ϕ 10 mm ;

Cette longueur pourrait être augmentée au maximum d'une longueur $e_{ext}/2$ en rajoutant un isolant autour de l'épingle sur le parement extérieur lors de la mise en œuvre : (cf. détails 2 de la Figure 3) cette configuration devra être précisée lors de l'élaboration du PAQ (Plan d'Assurance Qualité)

On limitera l'espacement horizontal entre les épingles à 1 m maximum. La longueur libre et l'espacement des épingles doivent également respecter les règles de dimensionnement décrites ci-dessous.

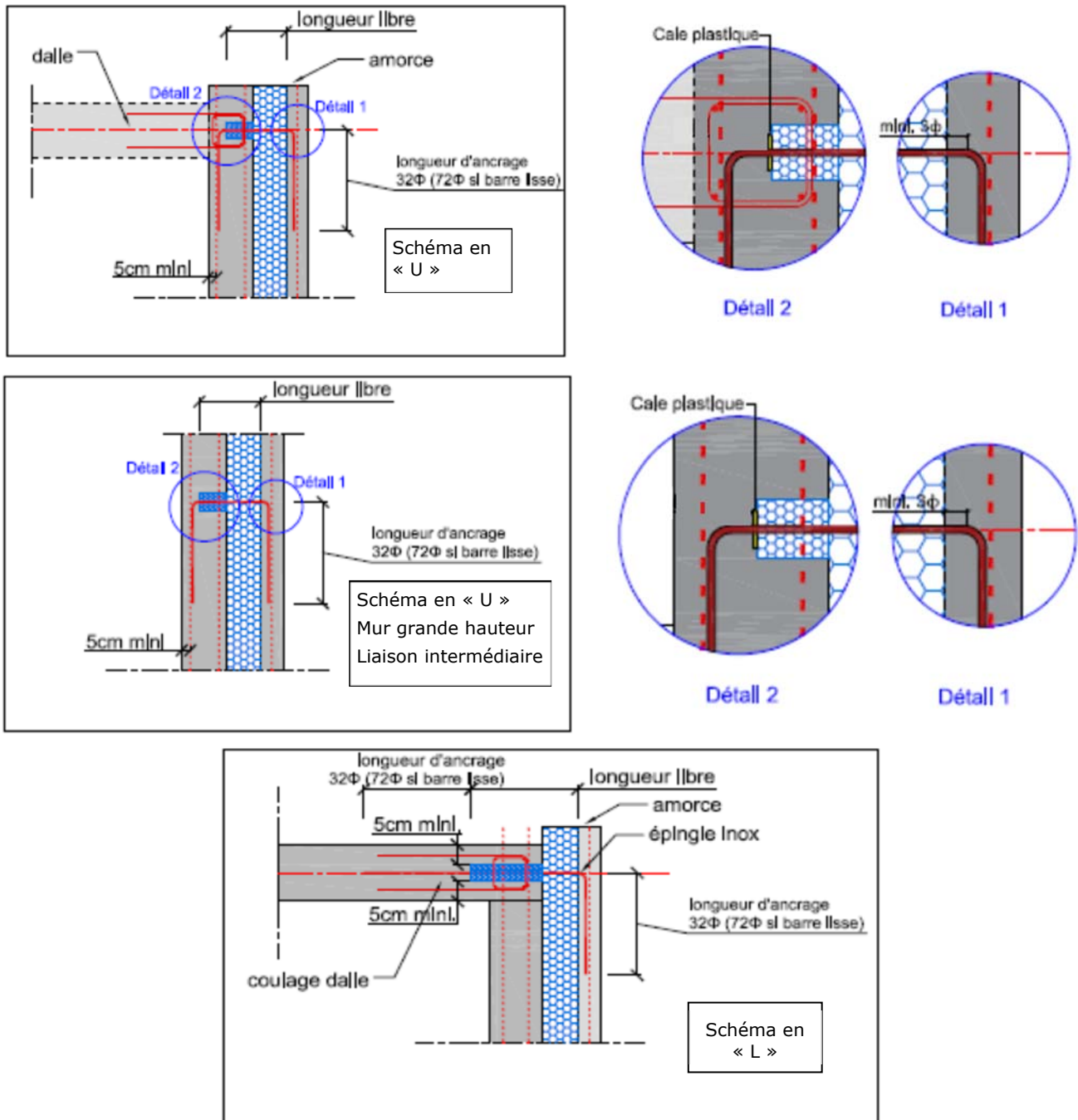
Leur dimensionnement porte sur 2 points :

Une longueur libre doit être respectée de manière à s'assurer que les déformations thermiques n'engendreront pas la plastification des épingles ;

La section d'acier inoxydable par m² doit être suffisante pour reprendre les efforts hors plan (vent et séisme) qui s'appliquent à la paroi sans flambement des épingles. Cette section définit le diamètre et l'espacement des épingles pour une longueur libre donnée.

Ces 2 points sont à dimensionner parallèlement et peuvent requérir des itérations étant donné que le diamètre des épingles a une influence sur la longueur libre. Concernant les aspects thermiques du dimensionnement de la paroi extérieure, la section minimale de ferrailage devra respecter les conditions d'armature minimale précisées au point §2.4.2.2.7.

Figure 3 : Disposition des épingles

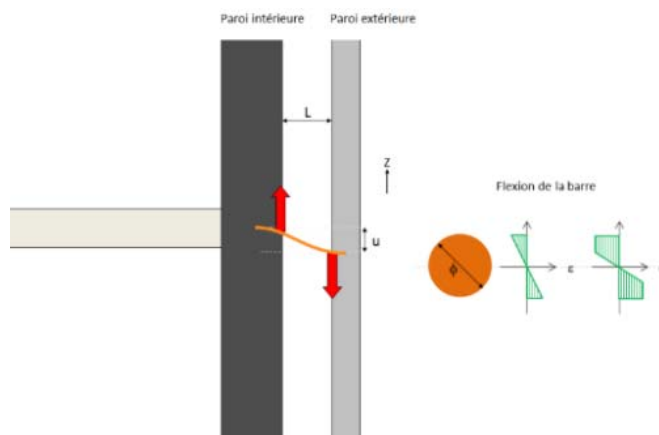


2.4.2.2.6.1 Calcul de la longueur libre des épingles

La tenue de la paroi extérieure est assurée par son appui en partie basse qui reprend le poids propre et des épingles en acier inoxydable de liaison souples qui assurent la transmission des pressions (vent par exemple)

L'objectif est de déterminer la longueur libre L qui prévient les épingles de diamètre ϕ de la plastification sous un déplacement d'amplitude u . Le déplacement u de la paroi extérieure dépend de la variation de température et de la distance maximale de tout point du voile par rapport au point fixe. La variation de température à considérer est définie selon l'Annexe Nationale de L'Eurocode 1 Partie 5 (NF EN 1991-1-5/NA) en fonction de la position géographique du bâtiment.

Figure 4 - Déformation d'une épingle et plastification de la section la plus sollicitée



A titre indicatif, le calcul du déplacement u de la paroi extérieure en situation bridée, en fonction de la distance au centre de dilatation h et de la variation de la température, est donné par :

$$u = k_u \alpha_{th} \Delta T h$$

Avec :

k_u : Coefficient lié au bridage de la paroi

α_{th} : Coefficient de dilatation du béton $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,

h : distance du point considéré de la paroi extérieure par rapport au centre de dilatation du voile h ,

ΔT_{max} : Variation de température de la paroi externe :

$$\Delta T_{Hiver} = T_{Hiver} - T_{ref}$$

$$\Delta T_{été} = T_{été} - T_{réf}$$

- Température de référence T_{ref} (au moment de la construction)
- Température de la paroi extérieure : T_{hiver} et $T_{été}$ (NF EN 1991-1-5/NA, §6.1.3.2)

Les valeurs de ΔT se situent de manière courante de 25 à 50°C. La température de la paroi intérieure est considérée stable.

Le déplacement maximal u_{max} dépend donc de la distance au centre de dilatation et des conditions de bridage (rappelons ici que les éléments de reprise des charges verticales (ex. consoles) constituent un bridage). Pour un panneau de dimensions ($L_{tot} \times H_{tot}$), soumis à la variation de température ΔT_{max} , on peut calculer u_{max} selon la formule suivante (un calcul par éléments finis est possible) :

$$u_{max} = k_u \cdot (L_u^2 + H_{tot}^2)^{1/2} \times \alpha_{th} \times \Delta T_{max}$$

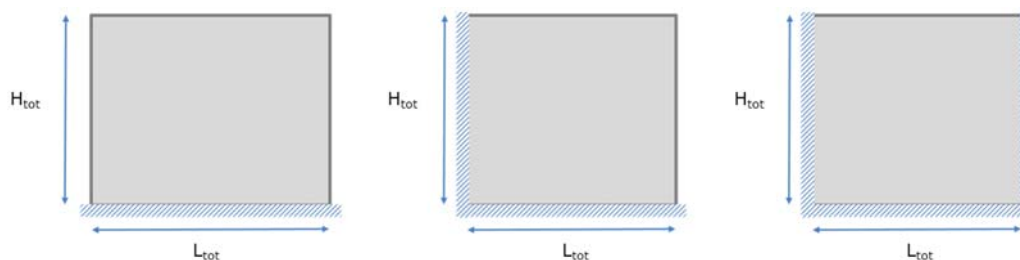
L_u la taille caractéristique du panneau pour les déplacements thermiques maximums

- Si bridage 1 bord (en pied) : $L_u = \min (L_{tot}/2 ; 2,5 \times H_{tot})$
- Si bridage 2 bords : $L_u = \min (L_{tot} ; 2,5 \times H_{tot})$
- Si bridage 3 bords : $L_u = 0$

H_{tot} est la hauteur de la paroi extérieure au-dessus de la zone d'appui en partie basse ;

L_{tot} est la distance entre joints de dilatation ou de fractionnement, ou entre 2 bords latéraux de la paroi extérieure bridés (les retours d'angle de la paroi extérieure constituent par exemple des zones de bridage)

Figure 5 – Bridage sur 1, 2 ou 3 bords des panneaux GBE



k_u est le coefficient de réduction de la dilatation thermique de la paroi extérieure lié au bridage. Il est présenté sur le tableau ci-dessous en fonction du type de bridage (1 bord, 2 bords ou 3 bords) et du rapport L_{tot}/H_{tot} :

Tableau 3 : k_u selon L_{tot}/H_{tot}

L_{tot}/H_{tot}			k_u
1 bord (en pied)	2 bords	3 bords	
≤ 1	$\leq 0,5$	Tous L_{tot}/H_{tot}	100%
2	1		95%
3	1,5		85%
4	2		75%
5 et +	2,5 et +		65%

Note 1 : Les valeurs intermédiaires peuvent être soit interpolées linéairement entre les valeurs du tableau, soit utilisées par palier défavorable. Dans ce dernier cas, on aura :

1 bord	2 bords	k_u
$\frac{L_{tot}}{H_{tot}} < 2$	$\frac{L_{tot}}{H_{tot}} < 1$	100%
$2 \leq \frac{L_{tot}}{H_{tot}} < 3$	$1 \leq \frac{L_{tot}}{H_{tot}} < 1,5$	95%
$3 \leq \frac{L_{tot}}{H_{tot}} < 4$	$1,5 \leq \frac{L_{tot}}{H_{tot}} < 2$	85%
$4 \leq \frac{L_{tot}}{H_{tot}} < 5$	$2 \leq \frac{L_{tot}}{H_{tot}} < 2,5$	75%
$5 \leq \frac{L_{tot}}{H_{tot}}$	$2,5 \leq \frac{L_{tot}}{H_{tot}}$	65%

Note 2 : Lors du calcul de l'épaisseur de joints verticaux suivant §2.5.2.10, la valeur de u_{max} à utiliser est $u_{max} = k_u \times L_u \times \alpha_{th} \times \Delta T_{max}$

Note 3 : on utilise en général u_{max} comme valeur enveloppe pour tous les points du panneau, mais des valeurs optimisées pourraient être évaluées selon la distance au centre de dilatation (par exemple différencier les épingles en partie haute et partie basse d'un voile de grande dimension). Dans ces cas, les valeurs de H_{tot} et L_{tot} sont substituées par les distances entre les épingles concernées et le centre de dilatation.

A titre indicatif, le calcul de u_{max} en fonction des conditions de bridage, géométrie du mur et de la variation de la température ΔT est données à l'Annexe VIII.

En considérant seulement le déplacement de la paroi extérieure d'amplitude u , cela conduit aux relations suivantes pour le calcul des efforts et de la contrainte maximale dans les épingles en fonction de son diamètre, du module d'élasticité et de la longueur libre :

$$M = \frac{6E_a I_a}{L^2} u$$

$$V = \frac{12E_a I_a}{L^3} u$$

$$\sigma = \frac{M}{I} = \frac{6E_a}{L^2} u \frac{\phi}{2} = \frac{3E_a \phi}{L^2} u$$

Il est possible de déterminer la longueur libre minimale des épingles pour prévenir leur plastification sous le déplacement $u = u_{max}$:

$$L > \sqrt{\frac{3E_a \phi u_{max}}{\sigma_{ay}}}$$

Il convient également de vérifier la concomitance des efforts thermique et sismique hors plan. Dans ce cas, les épingles en traction peuvent atteindre la limite élastique ; il convient de vérifier que la déformation maximale en fibre extrême de l'épingle est inférieure à la déformation ultime de l'acier : $\varepsilon_u \leq \varepsilon_{max}$.

Pour les épingles en acier inoxydable, les caractéristiques de déformation limites sont les suivantes (suivant la NF EN 1992-1) :

$$\varepsilon_y = 0,2\%$$

$$\varepsilon_{ud} = 0,9 \quad \varepsilon_{uk} = 4,5\%$$

On va donc chercher à déterminer les longueurs libres permettant de vérifier l'inégalité suivante :

$$\frac{u_{max}}{d} + 0,2\% \leq 4,5\%, \quad \text{soit } d \geq \frac{u_{max}}{4,3\%}$$

La longueur libre minimale devra être supérieure ou égale à 20ϕ afin de ne pas prendre en compte les déformations liées à l'effort tranchant.

La longueur libre respecte l'équation suivante :

$$L > \sqrt{\frac{3E_a \varphi u_{max}}{\sigma_{ay}}} > \text{Max} \left[20\varphi; \frac{u_{max}}{0,043} \right]$$

A titre indicatif, la longueur libre à respecter pour les épingles en fonction de l'amplitude du déplacement u et du diamètre des épingles est donnée à l'Annexe IX.

2.4.2.6.2 Calcul de la section d'acier des épingles en compression

En négligeant la présence de l'isolant entre les parois et sa capacité à long terme à reprendre des efforts, on considère que l'ensemble des efforts de compression passent dans les épingles de liaison.

Il est alors nécessaire de vérifier la résistance des épingles de liaison au flambement suivant les règles du §5.4.2 de l'Eurocode 3 et les articles §6.1 et §6.2. Les épingles sont supposées encadrées à leurs deux extrémités (coefficient de flambement $k_f = 0,5$). La longueur d'épuration des épingles est prise égale à la longueur libre en négligeant la présence de l'isolant comme support latéral.

Les caractéristiques de l'acier et les coefficients partiels sont donnés par :

Tableau 4 - Caractéristiques de l'acier et les coefficients partiels pour le calcul des épingles en compression.

Matériau				Coefficients partiels	
Acier	HA			γ_{M0}	1.00
f_{yd}	500	MPa		γ_{M1}	1.00
ϵ	0.67			γ_{M2}	
η	1				
E	200000	MPa			
λ_1	62.83				
k_f	0.5				
λ_0	0.2				
α	0.49				

Coefficient de flambement
Elancement réduit limite

Diamètre	mm	4	6	8	10
I	mm ⁴	12.5664	64	201	491
A	mm ²	12.5664	28	50	79
i	mm	1.00	1.50	2.00	2.50

En considérant que la pression F_{ah} , calculée à la section 2.4.2.2.2, s'applique sur le voile extérieur dans la direction hors plan, que h est la distance entre 2 rangées d'épingles et que e est l'espacement horizontal entre épingles, l'effort de compression par épingle qui s'applique sur les épingles s'exprime :

$$N_b = h \times e \times F_{ah}$$

Avec ces paramètres, on peut déterminer, pour chaque diamètre d'épingle, l'effort résistant au flambement des épingles en fonction de la longueur libre. Le dimensionnement consiste à définir le diamètre, la longueur libre et l'espacement des épingles de sorte que :

$$N_b < \chi \frac{A_s \times f_y}{\gamma_{M1}}$$

Avec (selon l'Eurocode 3) :

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} < 1$$

Et :

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda} - \lambda_0) + \bar{\lambda}^2 \right]$$

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i\lambda_1}$$

$$L_{cr} = 0,5(L + 2\varphi)$$

φ : diamètre de l'épingle

A titre indicatif, les valeurs des sections d'épingle et de l'espacement des épingles en fonction des configurations des projets (force issue de l'enveloppe des efforts hors plan, distance entre rangées d'épingles, le diamètre et la longueur libre) sont présentées dans l'Annexe VII.

La tenue de la paroi extérieure est assurée par son appui en partie basse qui reprend le poids propre et des épingles en acier inoxydable de liaison souples qui assurent la transmission des pressions (vent et séisme).

2.4.2.2.7 Armature minimale

La mise en place d'un ferrailage minimal est indispensable pour contrôler en tout temps la fissuration de la paroi extérieure sous les sollicitations thermiques.

Par conception, le voile extérieur GBE est un voile en béton armé traditionnel pour lequel le retrait du voile n'est bridé que par son ancrage en pied et éventuellement le blocage des déplacements horizontaux sur les bords latéraux (retours d'angle).

Pour les voiles de 15 cm d'épaisseur et plus (12 cm et plus si non exposés aux intempéries), les sections d'aciers minimales du DTU 23.1 sont applicables.

Pour les voiles de moins de 15 cm d'épais, la méthodologie proposée par l'Eurocode 2 section 7.3 complétée par l'Eurocode 2 partie 3 et le concept du coefficient de bridage, s'applique. Cette méthodologie est présentée ci-dessous.

Dans le domaine d'application du procédé GBE, les dispositions constructives suivantes permettent de respecter les exigences de l'Eurocode 2 (Une analyse par éléments finis peut aussi être réalisée en conformité avec l'Eurocode 2, cf.3 Annexe XI) :

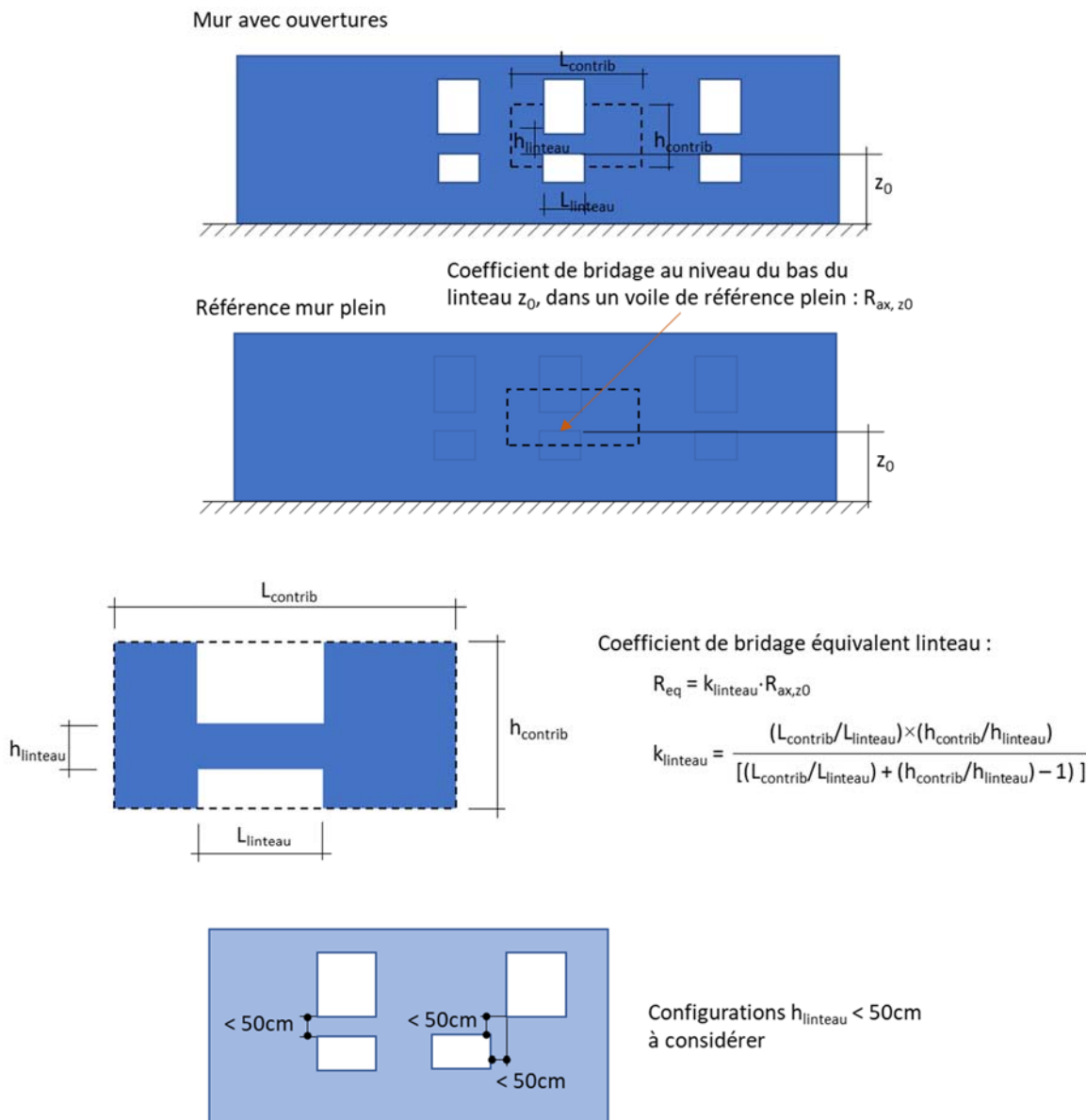
Mise en place a minima d'un ferrailage courant constitué d'un treillis soudé ST25C, ou de sections d'acier équivalentes soit 2,57 cm²/m dans chaque direction, sur une seule nappe au niveau de la fibre moyenne de la paroi extérieure, et ceci sur l'ensemble de la surface de la paroi.

Mise en place d'aciers complémentaires autour de chaque ouverture, en cohérence avec les sections 9.6.2 et 9.6.3 Note 1 de l'Annexe Nationale de NF EN 192-1-1/NA (cf. Annexe XII)

Mise en place d'un renfort éventuel supplémentaire au niveau des linteaux (voir également l'Annexe XI) :

- La zone de contribution de chaque linteau et le rapport k_{linteau} sont définis sur la Figure suivante et $k_{\text{linteau,MAXI}}$ est donné au Tableau 5 et au Tableau 6.

Figure 6 – Zone de contribution d'un linteau



- Dans le cas où $\max(\frac{L_{contrib}}{L_{linteau}}; \frac{h_{contrib}}{h_{linteau}}) > 10$ ou configuration $h_{linteau} < 50$ cm (selon Figure 6), $A_s = A_{s,max}$ (selon Tableau 7)

Sinon :

- Si $k_{linteau} < k_{linteau,MAXI}$, (ce qui est toujours vérifié si $\max(\frac{L_{contrib}}{L_{linteau}}; \frac{h_{contrib}}{h_{linteau}}) \leq k_{linteau,MAXI}$), le ST25C (§2,57 cm²/m) est suffisant dans le linteau

Sinon ($k_{linteau} \geq k_{linteau,MAXI}$), il est nécessaire de s'assurer de mettre en place une section totale d'armatures $A_{s,x}$ dans la direction x telle que :

$$A_{s,x} = 3,4 \times \phi_{eq} \times b / [(w_k/1000)/(R_{eq} \cdot (\psi_{th} \times \alpha_{th} \times \Delta T_{max,hiver})) - 110] \text{ en cm}^2/\text{ml}$$

- o w_k : ouverture des fissures en μm (en général 300 μm)
- o b : épaisseur en mm (entre 100 et 150 mm)
- o ϕ_{eq} : diamètre moyen des armatures de contrôle de la fissuration
- o $\alpha_{th} = 1 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$,
- o $\psi_{th} = 0,5$,
- o $\Delta T_{max,hiver}$ en $^\circ\text{C} = T_{min} - T_{ref}$, avec
 - a) T_{min} selon Tableau de la clause 6.1.3.2(1) de l'Eurocode 1 1-5 AN
 - b) T_{ref} selon, données du projet, valeurs météo locales, ou = 10 $^\circ\text{C}$ si aucune autre information (d'après l'Eurocode 1 1-5 AN clause A.1(3))
- o $R_{eq} = k_{linteau} \times R_{ax,z0}$ où $R_{ax,z0}$ est le coefficient de bridage selon l'EC2 Annexe L figure L.1, à la position z_0 du bas du linteau, déterminé pour un voile plein de référence (cf. Figure 6) :

$$k_{linteau} = \left(\frac{L_{contrib}}{L_{linteau}}\right) / \left[1 + \left(\frac{h_{linteau}}{h_{contrib}}\right) \times \left(\left(\frac{L_{contrib}}{L_{linteau}}\right) - 1\right)\right] > 1$$

Tableau 5 : $k_{linteau,MAXI} / ST25C / w_k = 300 \mu\text{m}$

$\Delta T_{max,hiver}$ ($^\circ\text{C}$)	Épaisseur mur (mm)					
	100	110	120	130	140	150
25	4,6	4,3	3,9	3,7	3,4	3,2
30	3,9	3,5	3,3	3,0	2,8	2,7
35	3,3	3,0	2,8	2,6	2,4	2,3
40	2,9	2,7	2,5	2,3	2,1	2,0
45	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8
50	2,3	2,1	2,0	1,8	1,7	1,6

Tableau 6 : $k_{linteau,MAXI} / ST25C / w_k = 400 \mu\text{m}$

$\Delta T_{max,hiver}$ ($^\circ\text{C}$)	Épaisseur mur (mm)					
	100	110	120	130	140	150
25	6,2	5,7	5,2	4,9	4,6	4,3
30	5,1	4,7	4,4	4,1	3,8	3,6
35	4,4	4,1	3,7	3,5	3,3	3,0
40	3,9	3,5	3,3	3,0	2,8	2,7
45	3,4	3,2	2,9	2,7	2,5	2,4
50	3,1	2,8	2,6	2,4	2,3	2,1

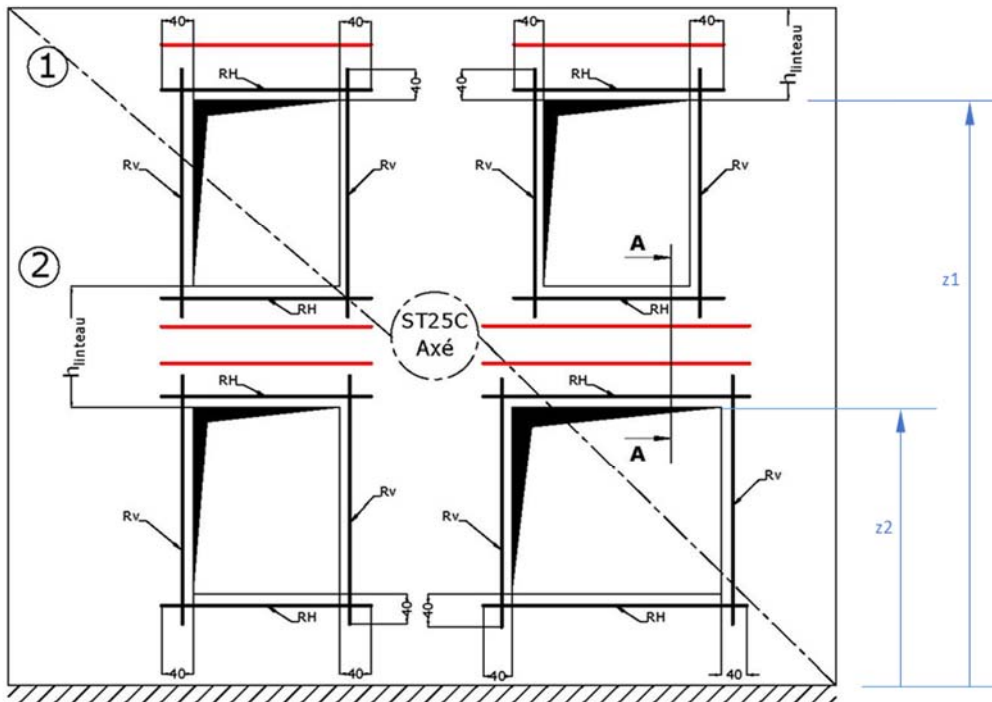
Les sections totales maximales requises pour le contrôle de la fissuration dans une direction sont les sections de non-fragilité définies dans le tableau suivant :

Tableau 7 - Ferrailage de non-fragilité en fonction de l'épaisseur de paroi et du béton

Épaisseur de paroi (mm)	Section maxi $A_{s,max-C25}$ pour C25/30* (cm ² /m)	
	100	110
100	5,2	5,7
110	5,7	6,2
120	6,2	6,8
130	6,8	7,3
140	7,3	

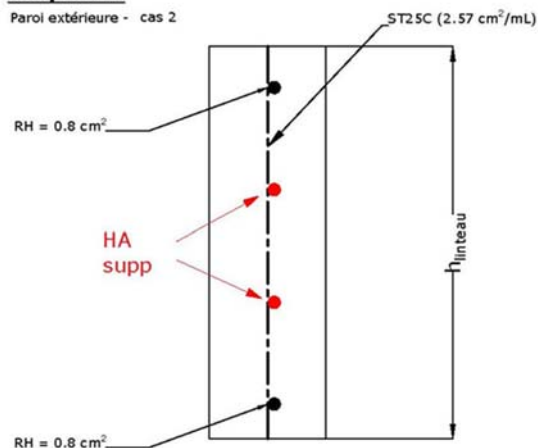
*pour un béton d'une autre classe de résistance, on aura $A_{s,max} = A_{s,max-C25} \times f_{ctm}/2,6$, avec f_{ctm} la résistance en traction du béton en MPa.

Figure 7 – Armatures supplémentaires pour linteaux



coupe A-A

Paroi extérieure - cas 2



h_{linteau}	Armature HA supp en cm^2	
	Cas 1 (Tête de voile)	Cas 2 (Entre deux ouvertures)
$\geq 50 \text{ cm}$	$\text{Max} \left[0; (A_{s,\text{linteau},z1} - 2,57) \times h_{\text{linteau}} - RH \right]$	$\text{Max} \left[0; (A_{s,\text{linteau},z2} - 2,57) \times h_{\text{linteau}} - 2 \times RH \right]$
$< 50 \text{ cm}$	$\text{Max} \left[0; (A_{s,\text{max},z1} - 2,57) \times h_{\text{linteau}} - RH \right]$	$\text{Max} \left[0; (A_{s,\text{max},z2} - 2,57) \times h_{\text{linteau}} - 2 \times RH \right]$

h_{linteau} en m

RH : Section d'armatures horizontales du ST25 présentes au linteau, en cm^2

$A_{s,\text{linteau}}$ et $A_{s,\text{max}}$ sont déterminés avec la formule pour $A_{s,x}$ et le tableau 7, respectivement

2.4.2.2.8 Ouvertures, zones en porte-à-faux et balcons

Pour des balcons qui forment une ouverture dans la paroi extérieure (désolidarisation du balcon et de la paroi extérieure) et au niveau des linteaux, le bureau d'étude doit vérifier, comme pour le mur intérieur, que l'armature de la paroi extérieure est suffisante pour reprendre des efforts de flexion selon les exigences de l'Eurocode 2.

Il convient de compléter systématiquement le ferrailage des peaux extérieures par des aciers de couture autour des ouvertures. Cette disposition permet de limiter les risques de fissuration.

A minima, tel qu'indiqué à la section 9.6.2 Note 1 et 9.6.3 Note 1 de l'annexe nationale NF EN 1992-1-1/NA, les armatures minimales suivantes sont à mettre en œuvre au niveau des angles des ouvertures :

Les angles des ouvertures pratiquées dans tout voile (telles que des fenêtres ou portes, etc.) doivent être bordés par des aciers verticaux d'au moins $0,68 \text{ cm}^2$ sur au moins $0,40 \text{ m}$ et convenablement ancrés ;

Pour les bâtiments et pour tout voile d'au plus 25 cm d'épaisseur, les ouvertures pratiquées dans tout voile (telles que des fenêtres ou portes, etc.) doivent être bordées par des aciers horizontaux d'au moins $0,8 \text{ cm}^2$ et convenablement ancrées.

Des croquis type de l'armature à ajouter aux angles des ouvertures sont donnés à titre indicatif à l'Annexe XII.

Lorsqu'il est nécessaire de mettre en œuvre des consoles et/ou bande noyées intermédiaires afin de reprendre les efforts verticaux (ex. voile/partie de voile démarrant à un étage donné, zones de linteaux au-dessus de grandes baies, ces éléments doivent être considérés comme des ancrages.

2.4.2.3 Durabilité

La durabilité des performances des murs pour les aspects d'étanchéité à l'air et à l'eau est avérée grâce au monolithisme du voile intérieur coulé en place, continu et solidaire de la structure du bâtiment.

Pour la durabilité des performances de l'isolant thermique, la garniture extérieure des joints est constituée généralement d'un mastic élastomère à bas module présentant une bonne déformabilité. Une telle caractéristique est indispensable compte tenu de l'amplitude des variations dimensionnelles des joints verticaux de la peau extérieure et des joints entre les menuiseries et le béton de la peau extérieure (les menuiseries sont fixées sur le voile intérieur).

La durabilité des performances mécaniques est assurée essentiellement par le respect des règles de conception du présent Avis Technique et une mise en œuvre respectant les règles habituelles aux ouvrages de béton armé.

L'enrobage des armatures du mur doit respecter les prescriptions définies dans la section 4 de la NF EN 1992-1-1 et son annexe nationale NF EN 1992-1-1/NA. L'utilisation de béton autoplaçant peut permettre de moduler la classe structurale recommandée en vue de la détermination des enrobages minimaux vis-à-vis de la durabilité, au sens du tableau 4.3 NF de l'annexe nationale de la norme NF EN 1992-1-1/NA. L'enrobage des armatures est choisi en fonction de la nature agressive ou non du milieu ambiant dans lequel sera placé le mur. C'est le cas aussi bien pour les parois extérieures et intérieures. Pour les façades exposées aux intempéries, l'enrobage minimal recommandé par l'Eurocode 2 selon la classe d'exposition est à assurer.

Au final, la durabilité d'ensemble des murs de façades du Procédé GBE est équivalente à celle de murs traditionnels en béton. Elle requiert cependant les prescriptions particulières suivantes :

L'exécution des travaux normaux d'entretien des façades en béton ;

La réfection des garnitures de mastic extérieures.

Les principes de conception des joints sont donnés au paragraphe §2.5.2.10

2.4.2.4 Sécurité incendie

Le Procédé de double mur isolé GBE® fait l'objet de l'Appréciation de laboratoire N° AL 16-176_V2 du CSTB, qui décrit les justifications à réaliser pour la vérification au feu

A partir des champs de températures, calculés, et fournis en Annexe XIX, dans le béton du voile exposé pour un feu intérieur en prenant en compte la présence de l'isolant, pour différentes épaisseurs de voile intérieur et différentes durées d'exposition, la résistance au feu du voile structural sous charges quelconques peut être vérifiée par les règles de calcul usuelles ;

La tenue au feu de la paroi extérieure est considérée comme vérifiée si les épingles supportent les efforts générés par la dilatation thermique de membrane et les efforts de traction ou d'arrachement dus à l'action du vent. Voir l'Appréciation de laboratoire N° AL 16-176_V2 pour le détail des méthodes de calcul.

Afin d'éviter la propagation du feu par l'isolant (effet cheminée), une des dispositions suivantes doit être prise (voir Annexe XVII) :

Protection de l'isolant au niveau des ouvertures par bandes de laine de roche : des bandes de laine de roche de 10 cm d'épaisseur sont disposées sur le pourtour des ouvertures (Figure 30, Figure 31 et Figure 32, Annexe XVII, §0). Ces bandes sont placées sur chantier avant le coulage et elles sont constituées de laine de roche de densité d'au moins 90 kg/m³

Protection par bandes de laine de roche horizontales filantes : un recouvrement par une bande de protection horizontale filante sur tout l'étage est réalisé à chaque niveau. Les bandes de laine de roche de densité d'au moins 90 kg/m³ ont une hauteur de 20 cm. (Figure 33, Figure 34 et Figure 35, Annexe XVII)

Protection de l'isolant au niveau des ouvertures par retour de bétonnage et joint coupe-feu (Figure 36, Figure 37 et Figure 38, Annexe XVII)

L'Appréciation de laboratoire AL 16-176_V2 présente également les dispositions constructives à respecter pour la justification du procédé mis en œuvre dans des bâtiments d'habitation de la 3ème et 4ème famille et les Immeubles de Moyenne Hauteur IMH (bâtiment à usage d'habitation dont le plancher bas du logement le plus haut est situé à plus de 28 m sans être considéré immeuble de grande hauteur).

2.4.3 Etanchéité

La nature des joints ne doit pas empêcher la libre dilatation de la peau extérieure. Ils nécessitent un entretien régulier et un remplacement des joints abîmés ou durcis.

2.4.4 Isolation thermique

La performance thermique du mur est conditionnée par l'épaisseur de l'isolant et par sa nature. La gamme des isolants possibles permet une compatibilité avec les exigences de la réglementation thermique 2012 et avec celles des maisons passives.

La performance intrinsèque des murs sandwich est caractérisée par un coefficient de transmission thermique surfacique U_p s'exprimant en W/(m².K). Le terme de résistance thermique (R) peut aussi être employé étant donné l'homogénéité du procédé en partie courante.

Les épingles de liaison créent des ponts thermiques intégrés.

Les vérifications sont à effectuer, dans chaque cas d'utilisation, selon les Règles Th-Bât en vigueur.

L'isolant disposé entre les deux parois détermine la performance thermique. Thermiquement, le procédé GBE peut être classé comme un procédé d'isolation thermique par l'extérieur du point de vue du traitement des ponts thermiques.

La détermination des coefficients de transmission thermique surfacique U, linéique Ψ ou ponctuel χ s'effectue comme décrit ci-dessous.

Le calcul du coefficient de transmission surfacique global d'une paroi U_p qui tient compte des ponts thermiques intégrés, se fait à partir de la relation suivante :

$$U_p = U_c + \Delta U = U_c + n_{sp} \cdot \chi_{sp} + n_e \cdot \chi_e$$

Où :

U_c est le coefficient de transmission thermique en partie courante du mur arrondi à 0,001 près, en W/m²/K calculé à partir de la relation suivante :

$$U_c = \frac{1}{R_{se} + R_t + R_{si}}$$

R_{se} est la résistance superficielle extérieure ($R_{se} = 0,04$ m².K/W)

R_{si} est la résistance superficielle intérieure ($R_{si} = 0,13$ m².K/W dans le cas d'une paroi verticale)

R_t est la somme des résistances thermiques des couches de matériau homogènes constituant la paroi, exprimée en m².K/W :

$$R_t = \sum_n \frac{e_n}{\lambda_n}$$

- e_n est l'épaisseur du matériau constituant la couche j du procédé en partie courante
- λ_n est la conductivité thermique du matériau de la couche j
- χ_{sp} et χ_e sont les coefficients de transmission du pont thermique intégré ponctuel correspondant respectivement aux connecteurs de placement et aux entretoises plastiques en W/K ;
- n_{sp} et n_e sont le nombre de ces éléments par m² de paroi.

Les coefficients de transmission thermique ponctuels χ_{sp} et χ_e sont évalués à :

$$\chi_{sp} = 0,0005 \text{ W/K et } \chi_e = 0,001 \text{ W/K}$$

Les ponts thermiques intégrés dus aux pièces plastiques du Procédé GBE peuvent être négligées compte-tenu de la densité de celles-ci par mètre carré de mur (2 à 3 connecteurs de placement /m² et 1 entretoise/m²)

En partie courante, les coefficients de transmission surfacique U_p s'obtiennent donc de manière classique (inverse de la somme des résistances thermiques de l'isolant et des parois en béton et des résistances superficielles).

En cas de lignes d'épingles prévues en position intermédiaire entre deux planchers, le calcul du coefficient de transmission surfacique doit prendre en compte les ponts thermiques ponctuels induits par ces épingles.

Les coefficients linéiques des ponts thermiques s'obtiennent sur la base de ceux donnés par le Fascicule 5 des Règles Th-U pour l'isolation par l'extérieur en prenant en compte une majoration pour les liaisons plancher/façade pour tenir compte des épingles en acier inoxydable qui traversent l'isolant.

2.4.5 Isolation acoustique

L'indice d'affaiblissement acoustique des murs extérieurs vis-à-vis des bruits de l'espace extérieur peut être déterminé comme étant celui de la paroi intérieure du mur, en l'absence d'essais acoustiques.

Compte-tenu des épaisseurs possibles de la paroi intérieure, d'au moins 14 cm, il est estimé qu'une façade en GBE® peut permettre d'obtenir les valeurs d'isolement de la réglementation (30 dB mini).

Les méthodes européennes de calculs (EN 12354-1 à 6) peuvent s'appliquer.

La performance du mur réalisé selon le Procédé GBE® qui rentre en compte dans le calcul de l'isolement intérieur entre deux pièces contiguës en façade est uniquement l'indice d'affaiblissement de la paroi béton intérieure du mur sandwich. Dans ce cas, il faut prévoir une paroi intérieure d'épaisseur supérieure ou égale à 160 mm.

2.5 Mise en œuvre

Pour l'exécution, il doit être établi des plans d'armatures des parois intérieures et extérieures, ainsi qu'un plan de calepinage de la position des épingles de liaison.

Un carnet de détails définissant les points singuliers du procédé, dans le respect du présent dossier technique, doit également être établi.

La mise en œuvre peut être réalisée par toute entreprise de gros œuvre de technicité confirmée en béton armé avec une main d'œuvre qualifiée (coffrage, ferrailage et coulage du béton)

Le procédé GBE® relève d'un mode de mise en œuvre traditionnel de mur en béton banché. Toutefois, les spécificités liées à la présence de l'isolant dans le mur imposent la mise en place et le suivi d'un Plan d'Assurance Qualité par l'entreprise mettant en œuvre les murs GBE®. Ce PAQ devra notamment prévoir un contrôle avant chaque coulage. Le contrôleur doit vérifier la propreté des coffrages, les épaisseurs des parois, la nature, la quantité, la position et l'enrobage des armatures et aciers en attentes sur la base des plans établis par le bureau d'études et la nature, le nombre, la position et le respect de la longueur libre des épingles de liaison.

2.5.1 Etapes de mise en œuvre

Le phasage de réalisation du mur sandwich coulé en place est illustré en Annexe XVI.

Il se déroule conformément au Mode Opératoire, dans l'ordre suivant :

2.5.1.1 Amorce

Réalisation d'une amorce sur la fondation ou sur une console filante en cas de démarrage du Procédé GBE en superstructure. Dans le cas de murs GBE d'un étage à l'autre, cette amorce peut être créée par l'arase supérieure du mur sandwich de l'étage sous-jacent.

Il faut veiller à la verticalité, l'alignement et le recouvrement des armatures en attente.

2.5.1.2 Paroi intérieure

Après avoir assemblé les banches selon les préconisations des fabricants et les avoir nettoyées, l'entreprise procède à la mise en place, côté intérieur, du premier train de banches avec ses stabilisateurs. Les opérations classiques suivantes sont effectuées : mise à niveau du train de banches, réglage de l'aplomb, traçage du train de niveau, des ouvertures et des réservations, installation, réglage et fixation des mannequins et réservations, pose des abouts de coffrage. Tous les éléments de coffrage doivent être mis en place afin de garantir l'étanchéité du coffrage. Les mannequins et leurs fixations doivent être renforcés compte-tenu de la pression exercée par un béton très fluide.

Puis on procède à la mise en place du ferrailage de liaison contre la banche (boîtes d'attentes), le voile intérieur du procédé étant en liaison avec les refends et les planchers, ainsi que des armatures propres de la paroi intérieure et des gaines, des réseaux et réservations diverses pour les corps d'état secondaires.

2.5.1.3 Isolant

Pour équiper l'isolant, il faut insérer la dague correspondant aux épaisseurs du mur à réaliser dans l'isolant et positionner le verrou. Le système de positionnement de l'isolant est solidarisé en faisant pivoter le verrou d'un quart de tour pour bloquer l'ensemble de façon à empêcher la désolidarisation. La répartition des dagues-verrous se fait avec un minimum de 4 par panneau d'isolant, au voisinage des angles, avec une distance de 10 à 25 cm des bords de panneaux, et en assurant une distance maxi de 1 m entre chaque dague (chaque dague est à 1 m maximum de deux autres dagues – voir Annexe XVI). La densité de ces pièces peut être augmentée au voisinage des points singuliers et en cas de coulage de grande hauteur.

L'isolant est placé avec le système de positionnement qui doit venir en butée contre la banche intérieure. Les pièces plastiques peuvent être tournées grâce à la molette extérieure de façon à éviter le ferrailage intérieur puis s'y accrocher et ainsi permettre le maintien de l'isolant tant que la banche n'est pas fermée.

On utilise ensuite les entretoises auto-foreuses du procédé munies de manchons que l'on insère dans l'isolant au droit des trous de serrages jusqu'à être en butée contre la banche intérieure. Ces entretoises permettent d'empêcher le soulèvement de l'isolant lors du coulage du béton, de reprendre les efforts de compression lors du serrage des banches et de reprendre des efforts lors de la mise en place des passerelles (voir Annexe V pour la justification de tenue des passerelles).

Les plaques d'isolant sont juxtaposées en veillant à assurer la continuité de l'isolation.

Les bandes de laine de roche éventuellement nécessaires à la protection au feu de l'isolant sont à intégrer.

2.5.1.4 Paroi extérieure

On procède ensuite à la mise en place du ferrailage de la paroi extérieure conformément au plan d'armatures contre l'isolant avec des cales pour garantir l'enrobage et le positionnement de ces armatures à mi-épaisseur de la paroi extérieure

2.5.1.5 Épingles de liaison

La dernière étape avant de refermer le coffrage est la mise en place des épingles en acier inoxydable. Ce sont elles qui assurent la liaison des deux parois du mur en phase définitive.

Elles sont en forme de U ou de L selon le dimensionnement du Bureau d'Etudes structure. L'obtention de la longueur libre nécessaire à la bonne tenue structurelle du mur sandwich se fait grâce à l'utilisation de manchons en polystyrène. Ces manchons doivent uniquement recouvrir la partie droite des épingles. La partie courbe doit être totalement ancrée dans le béton avec une longueur droite d'au moins 3Φ avant le début de la courbure (voir Figure 3). La mise en place d'une cale plastique adaptée au petit diamètre de l'épingle permet de maintenir la position du manchon sur l'épingle.

2.5.1.6 Coulage du béton

Le coulage des voiles intérieurs et extérieurs se fait en continu avec un béton autoplaçant (Cf. 2.3.1) de type Ultra Twin Procédé GBE de Lafarge France ou équivalent, afin d'assurer une qualité de mise en œuvre et de parement. Le coulage des deux faces se fait en simultané.

Il nécessite un contrôle de la vitesse de bétonnage des deux parois qui doit être identique des deux côtés (différence de hauteur de béton toujours inférieure à 50 cm entre les deux parois tout au long du coulage) afin d'éviter tout phénomène de cisaillement de l'isolant et de conserver correctement son positionnement dans le coffrage. A cet effet, une des dispositions suivantes doit être prise :

Pour des murs ne dépassant pas une hauteur de banche, contrôle visuel depuis le haut de la banche ;

Outil de coulage spécifique (répartiteur à deux sorties, adapté à l'épaisseur des deux parois) ;

Mesure de la hauteur entre le béton et le haut du coffrage dans chacune des parois à l'aide de télémètres par exemple. Coulage par bennes remplies de 1 m^3 de béton et contrôle entre chaque benne.

Il convient de s'assurer de la capacité des coffrages à supporter la pression du béton.

Le bétonnage des deux parois en béton doit être réalisé conformément aux prescriptions de la norme NF EN 13670 et des « Recommandations pour l'emploi des bétons autoplaçants » de janvier 2008 (éditées par l'AFGC / PN B@P) et plus particulièrement vis-à-vis de la limitation de la chute libre du béton.

La hauteur de chute du béton est dans ce sens limitée à 5 m avec l'utilisation du béton ULTRATWIN de la société Lafarge France. Dans le cas d'utilisation d'un béton équivalent respectant les exigences du §2.3.1 du Dossier Technique, des essais de convenance devront être réalisés pour valider une hauteur de chute supérieure à 3 m et inférieure ou égale 5 m. En absence des essais de convenance, la hauteur de chute du béton est limitée à 3 m.

Lorsque la hauteur de chute du béton est supérieure à 5 m, le coulage doit se faire par l'intermédiaire de tubes plongeurs adaptés à introduire dans chacune des parois. Pour permettre ce type de coulage, une épaisseur de la paroi extérieure de 15 cm est nécessaire. Les tubes plongeurs doivent avoir un diamètre intérieur de 65 mm au minimum et le béton doit alors avoir comme diamètre maximal des plus gros granulats $D_{max} = 8 \text{ mm}$.

Tableau 8 – Disposition de mise en œuvre du béton à adopter en fonction du béton utilisé et de la hauteur de chute

Béton à utiliser	Hauteur de chute du béton	Épaisseurs des parois admises		Isolant	Épaisseur totale du mur	Disposition de mise en œuvre du béton à adopter
		Paroi intérieure	Paroi extérieure			
Béton Lafarge Ultra Twin	≤ 5 m	14 à 45 cm	≥ 10 cm	5 à 34 cm	≥ 29 cm	
	> 5 m	15 à 45 cm	≥ 15 cm	5 à 34 cm	≥ 35 cm	Utilisation des tubes plongeurs.
Béton équivalent	≤ 3 m	14 à 45 cm	≥ 10 cm	5 à 34 cm	≥ 29 cm	
	> 3 m et ≤ 5 m	14 à 45 cm	≥ 10 cm	5 à 34 cm	≥ 29 cm	Essais de convenance à réaliser. Autrement la hauteur de chute du béton est limitée à 3 m.
	> 5 m	15 à 45 cm	≥ 15 cm	5 à 34 cm	≥ 35 cm	Utilisation des tubes plongeurs.

Les points de coulage devront être suffisamment rapprochés, l'intervalle entre deux points de coulage ou un point de coulage et l'extrémité du voile doit être inférieur à 5 m.

Pour les chantiers sur lesquels un parement esthétique est recherché. Un échantillon de mur est à réaliser en début de chantier pour valider les exigences esthétiques entre le maître d'œuvre, l'entreprise et le fournisseur de béton.

2.5.1.7 Décoffrage

Le décoffrage du mur sandwich se fait de la même manière qu'un voile en béton banché classique.

Le décoffrage ne doit pas être effectué en cas de vent supérieur à 85 km/h.

2.5.1.8 Contrôles

La mise en œuvre du procédé de mur GBE fait l'objet d'un plan d'autocontrôle spécifique comprenant :

- Vérification de la formation de l'équipe chargée de la mise en œuvre : acquisition de la méthodologie. La traçabilité de formations délivrées par le titulaire devra être assurée ;
- Insertion des connecteurs extérieurs (dagues) et mise en place des connecteurs intérieurs (verrou) dans les plaques d'isolants ;
- Positionnement et fixation des plaques d'isolants contre le ferrailage ;

Contrôle de la réalisation des plans de calepinage des panneaux d'isolants et des pièces plastiques. Ces plans sont réalisés par l'entreprise de gros œuvre en charge du chantier.

- Contrôle de la bonne fixation des connecteurs extérieurs et intérieurs ;
- Mise en place des plaques d'isolant en vérifiant d'être jointif ;
- Contrôle par pression manuelle de la bonne tenue des plaques d'isolation au ferrailage ;
- Vérification de la bonne tenue du ferrailage ;
- Contrôle des épingles de liaison en acier inoxydable ;
- Vérification de l'équerrage et positionnement des mannequins et châssis avant la fermeture des banches ;
- Contrôle de l'aspect de la matrice éventuelle avant fermeture des banches ;
- Contrôle de la verticalité des coffrages et de l'alignement des banches ;
- Vérifier les assemblages des banches et l'étalement avant le début du bétonnage ;
- Contrôle de l'aplomb des banches après le coulage ;

Vérification de la stabilisation totale du mur béton avant décoffrage complet.

La réalisation des auto-contrôles mentionnés ci-dessus fait l'objet d'un enregistrement dans des fiches de contrôle datées, numérotées et signées par le responsable du contrôle, avec identification du chantier, de l'ouvrage contrôlé, de la nature du contrôle réalisé (description et objectif), du résultat de contrôle (conforme, non-conforme, observations) et du traitement décidé en cas de non-conformité. Un exemple de fiche d'auto-contrôle est donné en Annexe XVIII.

Tolérances d'exécution

Durant la mise en œuvre du procédé GBE, différentes prescriptions sur les tolérances sont à respecter. L'objet de ces tolérances est d'assurer un bon fonctionnement des joints, des ouvrages et, pour certaines d'entre elles, une régularité de l'aspect extérieur des bâtiments.

Les tolérances de mise en œuvre à respecter sont les suivantes :

- Épaisseur des joints horizontaux et verticaux : +/- 5 mm ;
- Épaisseur des parois : +/- 10 mm ;

Alignement entre panneaux d'isolant adjacents : décalage de 5 mm.

Autres tolérances dimensionnelles d'exécution des ouvrages en béton : prescriptions du DTU 21 (chapitre 7) et du DTU 23.1 (§3.3).

2.5.2 Eléments particuliers

2.5.2.1 Traitement des retours d'angles

Pour les épingles, la répartition uniforme des épingles ne présente pas de problématique particulière, les épingles restant dans l'ensemble dans le domaine élastique. Pour les angles sortants, aucune disposition particulière additionnelle n'est requise.

Un risque de plastification des épingles existe dans le cas d'un angle rentrant avec deux parois adjacentes de longueurs supérieures à 8m et une continuité de ces parois à leur extrémité. Pour éviter ce phénomène, il est nécessaire de s'assurer que la dernière épingle est située à au moins 60 cm du coin de l'angle. Alternativement, si la dernière épingle est située entre 50 et 60 cm de l'angle, il faudra vérifier que la longueur cumulée entre joints des murs, dans des configurations de retour de façade soit inférieure ou égale à 21 m.

2.5.2.2 Balcons

Les balcons peuvent être réalisés de plusieurs manières

1. Balcons solidaires de la structure intérieure et traversant l'isolant et la paroi extérieure

Afin de limiter les ponts thermiques linéiques, il est recommandé de limiter le porte-à-faux des balcons et de prévoir des bandes pleines en porte-à-faux sur lesquelles la dalle de balcon porte parallèlement aux façades. Cette disposition permet d'assurer la continuité de l'isolation thermique sur la plus grande partie de l'interface balcon/façade.

Ces balcons, qu'ils soient préfabriqués ou coulés en place, doivent être étayés pendant le temps nécessaire à la montée en résistance du béton dans la dalle servant à l'équilibrage.

Ces balcons doivent reposer sur la paroi intérieure sans mettre en charge la paroi extérieure qui doit rester librement dilatable par un jeu entre la paroi extérieure et le balcon.

Les réservations dans la paroi extérieure se font en laissant un jeu avec le balcon. L'étanchéité à la pluie est assurée par la mise en œuvre d'un joint mastic élastomère 1ère catégorie sur fond de joint (sous-face et chants verticaux).

Les réservations dans la paroi extérieure et l'isolant au droit du balcon se font lors de la réalisation du voile situé sous le balcon.

Lorsque la paroi extérieure est interrompue au droit du balcon, un jeu est à prévoir entre la peau extérieure et l'arase supérieure du balcon.

Dans tous les cas, les sous-faces de balcons doivent comporter une goutte d'eau sur 3 faces et les surfaces doivent être inclinées vers l'extérieur afin de limiter la présence d'eau en pied de mur

2. Balcons solidaires de la paroi extérieure

Ce cas n'est possible que pour des balcons ou loggia qui ne sont pas structurellement en porte-à-faux

2.5.2.3 Mise en œuvre des menuiseries

Les menuiseries doivent être fixées sur la paroi intérieure et être conçues pour ne pas être en contact avec la peau extérieure dilatable. Un joint d'étanchéité continu doit être mis en place entre les dormants et les parois en béton au nu extérieur de la paroi intérieure.

Lorsque la pièce d'appui de la fenêtre ne reprend pas l'épaisseur totale du mur, la tranche supérieure de l'isolant et de la paroi extérieure est recouverte d'une bavette rapportée.

Des dispositions doivent être prévues pour évacuer les éventuelles eaux d'infiltrations pouvant s'accumuler en traverse haute (joint laissé libre).

2.5.2.4 Traitement des trous de banches

Les entretoises comportent des embouts à leurs deux extrémités. Ils sont destinés à être retirés et réutilisés. Il est ainsi possible de procéder au rebouchage des trous laissés par les entretoises de la manière suivante :

Rebouchage avec de l'isolant comme de la mousse polyuréthane pour assurer la continuité de l'isolation.

Pour la paroi extérieure, il est possible d'utiliser des bouchons en béton préfabriqués dans des moules spécifiques avec le béton utilisé pour les façades.

Pour la paroi intérieure, le rebouchage se fait au mortier.

2.5.2.5 Traitement des acrotères

La conception des acrotères doit répondre aux prescriptions générales du DTU 20.12.

Les acrotères sont constitués par un prolongement du voile intérieur du dernier niveau. Dans ce cas, il est conseillé de reconstituer l'isolation thermique autour de la partie porteuse du mur située en extérieur.

S'il n'est pas totalement isolé, le ferrailage de la partie structurelle de l'acrotère doit comprendre des armatures longitudinales de section suffisante pour éviter une fissuration préjudiciable au système d'étanchéité choisi. Un taux de ferrailage de 0,4 % de la section de béton convient dans le cas courant.

Les acrotères peuvent également être constitués d'éléments spécifiques. L'isolation thermique peut être assurée par l'intermédiaire de rupteurs de ponts thermiques ou par un vide rempli d'isolant entre la couche isolante de la toiture et celle du mur sandwich.

Les têtes de murs exposées aux intempéries sont protégées contre les infiltrations d'eau par une couverture recouvrant toute l'épaisseur du mur et fixée uniquement sur la paroi intérieure structurelle.

2.5.2.6 Murs enterrés

L'utilisation du procédé pour des murs de locaux enterrés est possible sans autre modification dès lors que la paroi extérieure est revêtue d'un complexe étanche et que son épaisseur est égale à 15 cm.

Pour des profondeurs supérieures à 1 m, l'une des dispositions constructives suivantes doit être appliquée :

Soit la suppression de l'isolant pour créer une paroi pleine en béton armé traditionnelle. Dans ce cas, le dimensionnement de la structure porteuse est fait de manière traditionnelle.

La mise en œuvre de liaisons rigides verticales, afin d'assurer la transmission des sollicitations de poussées des terres vers la structure porteuse.

Dans ce cas, le calcul de structure porte d'une part sur la vérification de la stabilité et le dimensionnement de la paroi intérieure sous les sollicitations de poussées des terres ; et d'autre part, à la vérification de la stabilité et au dimensionnement de la paroi extérieure sous les poussées des terres vis-à-vis de la flexion entre connexion rigide et du cisaillement. La paroi extérieure est assimilée à une plaque appuyée sur la bande verticale et soumise à une pression uniforme répartie. La partie enterrée (profondeur supérieure à 1m) n'est pas considérée comme librement dilatable.

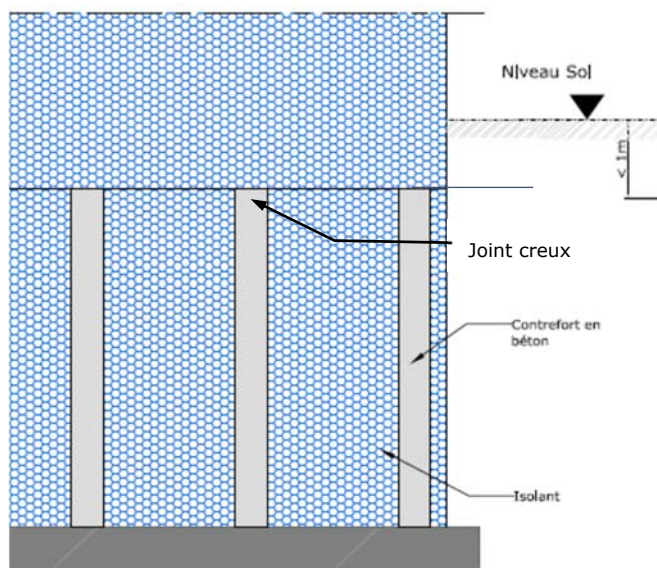
En l'absence d'un calcul spécifique du bureau d'étude, pour une hauteur enterrée jusqu'à 6 m, des contreforts de 150 mm de largeur doivent être réalisés avec un espacement entre-axe maximum de 1,4 m. Les relations de la section 2.4.2.2.2 s'appliquent de manière conservatoire avec une portée de flexion $L = 1,4$ m, F_{ah} étant substituée par la pression uniformément répartie des terres.

Pour une épaisseur de 15 cm, sans surcharge sur le remblai, la quantité d'armature horizontale (barre de diamètre 8 par mètre) à ajouter en complément du ST25C est donnée au tableau suivant :

Tableau 9 : Ferrailage en complément en fonction de la hauteur de mur enterrée

Profondeur m	Barre $\phi 8$ n_h
0 à 1	0
1 à 2	0
2 à 3	0
3 à 4	1
4 à 5	2
5 à 6	3

Figure 8 : Murs enterrés (élévation dans l'épaisseur de l'isolant)



2.5.2.7 Toiture-terrasse

Lorsque des murs GBE sont implantés au-dessus d'une toiture-terrasse, le procédé d'étanchéité doit être fixé verticalement sur la peau extérieure liaisonnée au plancher béton de la toiture. Il faut donc prévoir le dispositif de rejet des eaux du mur (§2.5.2.9) au-dessus du relevé d'étanchéité de la toiture et une bande solin en protection.

2.5.2.8 Eléments en saillie fixés à la façade

Ces éléments (garde-corps par exemple) doivent être fixés dans la paroi intérieure, sans empêcher la libre dilatation de la paroi extérieure. Le scellement des fixations est à prévoir en avance.

2.5.2.9 Etanchéité des murs

Il est admis que la paroi extérieure n'est pas étanche à l'eau.

Les dispositions constructives suivantes permettent d'assurer l'évacuation vers l'extérieur des éventuelles eaux d'infiltration et de condensation en partie basse du mur.

A la base de la superstructure ou en tout point d'appui continu de la paroi extérieure, il est prévu la mise en œuvre d'une bande d'étanchéité (bande bitumineuse conforme aux normes NF EN 14697 et NF EN 12310-1 ou bien PVC) remontée sur la paroi intérieure côté isolant d'une hauteur minimale de 10 cm, avec un recouvrement minimal de 20 cm, et la réalisation de barbacanes. Un tuyau en plastique rigide de diamètre intérieur minimal de 30 mm est mis en place tous les 2 m au maximum. Ce diamètre peut être réduit à 20 mm si on espace les évacuations de 1 m au maximum.

Des dispositifs d'évacuation des éventuelles eaux d'infiltration sont prévus en partie haute des menuiseries extérieures.

2.5.2.10 Traitement des joints de fractionnement sur la peau extérieure (Annexe XVII – Figure 26 à Figure 29)

En cas de découpage de la paroi extérieure, les joints doivent être rebouchés pour éviter les infiltrations.

Le traitement des joints peut être fait :

Soit au moyen d'un mastic SNJF de 1ère catégorie, élastique à bas module, sur fond de joint. La largeur des joints (e_j) doit respecter la dimension minimum suivante :

$$e_j \geq 4 \times u_{max}$$

- Avec ΔT l'écart entre la température la plus extrême attendue et la température lors de la construction et u_{max} déplacement maxi relatif entre bords de panneaux à la ligne de joint selon le paragraphe 4 de l'Annexe I.
- Notons que le facteur 4 correspond au cas d'un matériau de remplissage qui permet d'absorber 25% de son épaisseur.
- Soit au moyen d'une bande de membrane EPDM d'au moins 20 cm de largeur disposée en fond de joint. Celle-ci est positionnée contre l'isolant avant le coulage du béton.

Concernant les joints horizontaux de la peau extérieure, des bandes de laine de roche sont disposées en protection contre le feu.

En cas de sollicitation sismique, l'épaisseur des joints éventuels peut être amenée à être augmentée en fonction de l'étude structure.

Le tracé et les épaisseurs des joints de dilatation structurels du bâtiment sont prolongés dans la peau extérieure.

La nature des joints ne doit pas empêcher la libre dilatation de la paroi extérieure.

Ils nécessitent un entretien régulier et un remplacement des joints abimés ou durcis.

2.5.2.11 Finitions

Finitions extérieures :

- Toutes les finitions et revêtements possibles sur des murs en béton banché sont applicables sur les murs sandwich GBE. La face extérieure des murs GBE peut aussi être de type béton brut ou autre béton de parement (béton matricé, sablage, etc.).
- La conception et la mise en œuvre des murs GBE permet d'obtenir un parement extérieur régulier et sans fissuration importante.
- Les qualités d'aspect des façades dépendent du découpage choisi pour la peau extérieure, de l'épaisseur choisie pour cette paroi extérieure, de la qualité du béton et du soin apporté à la mise en œuvre du procédé et du béton.
- En vue d'obtenir un aspect convenable aux reprises de bétonnage visibles, il est conseillé de souligner la reprise (joint creux baguette).

Réparation des défauts d'aspects :

- Les reprises éventuelles en cas de béton apparent peuvent faire l'objet d'une procédure spécifique adaptée aux différents cas rencontrés. Le fournisseur de béton prêt à l'emploi peut convenir avec l'entreprise de la méthodologie de reprise (matériaux de la centrale, ...)

Finitions intérieures :

- Le Procédé GBE permet d'obtenir une surface intérieure régulière et une continuité d'aspect facilitant les travaux de revêtement et de peinture

Entretien et réparation

- Les traitements (peintures, enduits, imprégnation) qui favorisent la conservation des qualités des bétons non revêtus doivent être renouvelés.

2.6 Mode d'exploitation

2.6.1 Rôle et responsabilités

La figure suivante décrit les différentes phases de réalisation d'un projet et d'intervention de chacune des parties prenantes.

La fourniture des pièces plastiques (entretoises et système de positionnement de l'isolant, et outils spécifiques associés) est assurée par GBE

La fourniture du béton spécifique Ultra Twin Procédé GBE est assurée par Lafarge France. Dans le cas d'utilisation d'un autre béton, son fournisseur doit garantir que le béton satisfait aux critères décrits au paragraphe §2.3.1 « Béton ». Le calcul des structures est effectué par le BET Structures du chantier en tenant compte des spécificités du procédé développées dans le présent Avis Technique.

La mise en œuvre est de la responsabilité de l'entreprise de gros œuvre.

Elle doit réaliser ces opérations en suivant les prescriptions du Dossier Technique.

GBE et Lafarge France peuvent assurer le support technique nécessaire, dans le cadre de la conception de projets intégrant des ouvrages murs sandwich GBE selon le présent Avis Technique.

Le support technique en phase de réalisation de murs sandwich GBE peut être assuré par GBE. Lafarge France contribue au support technique lors de la réalisation lorsque le béton Ultra Twin est utilisé.

Figure 9 – Rôles et responsabilités

Phase	Concerne	Points critiques
Plans architectes Proposition épaisseur Proposition finitions (revêtement, matricage ...)	Architecte / BE structure + Thermicien Conseil GBE/Lafarge	Gabarit, emprise Descente de charges Menuiseries extérieures Intégration CET (gainés)
Etude des points singuliers Ouvertures - Balcons	BE structure / entreprise Conseil GBE/Lafarge	
Fonds de plans béton (coffrage)	BE structure	
Validation architecte	Maitrise d'œuvre et Maîtrise d'ouvrage	Validation Maîtrise d'ouvrage
En cas de parement béton apparent Prototype pour validation architecte	Lafarge si fournisseur BPE Entreprise	Prototype
Commande pièces plastiques GBE Livraison	Entreprise GBE	Tenue des délais de livraison
Mise en œuvre (coffrage, coulage, décoffrage)	Entreprise	Sécurité chantier
Finitions	Entreprise Conseil Lafarge si fournisseur BPE	Réception par architecte

2.6.2 Formation

La mise en œuvre doit se faire dans le respect de prescriptions de l'Avis Technique. Elle nécessite en outre de l'entreprise de mise en œuvre des précautions particulières et une qualification des équipes de coffreurs-bancheurs. GBE et Lafarge France fournissent aux entreprises un guide de mise en œuvre et un mode opératoire et GBE met à leur disposition, sur leur demande, des possibilités de formation du personnel.

GBE et Lafarge France diffuseront le contenu du présent Avis Technique et notamment le domaine d'emploi accepté et les prescriptions techniques dont il est assorti.

3 Résultats expérimentaux

3.1 Acoustique

Rapport d'étude RD/GBE/AC/002/V1 - Etudes acoustiques réalisées dans le cadre du dossier d'ATEX pour le Procédé GBE® – 11 pages.

3.2 Thermique

Rapport d'étude RD/GBE/TH/001/V1 - Calculs thermiques réalisés dans le cadre du dossier d'ATEX pour le Procédé GBE® – 33 pages.

3.3 Structure

Rapport NECS N002_456_LAFARGE_A9 – Etude de faisabilité du procédé de double mur isolé GBE - Justification de la tenue mécanique en vue de l'obtention de l'ATEX – 50 pages.

Rapport NECS N003_A456_LAFARGE_B Application sur un cas de bâtiment : projet « Résidence Opheor, Renaison » Dimensionnement du ferrailage de la paroi extérieure et des épingles sous divers – 79 pages

Rapport NECS N004_456_LAFARGE_B – Etudes complémentaires- 48 pages

Rapport NECS N005_A456_LAFARGE_B - Etudes techniques complémentaires – 38 pages

Rapport NECS N006_A456_LAFARGE_C – vérification des connecteurs avec du béton au jeune âge – 13 pages

Rapport NECS N001_A833_GBE_A – Analyse des armatures minimales pour le contrôle du risque de fissuration sous retrait thermique – 80 pages

3.4 Matériaux

Exemples de certificats ACERMI d'isolants adaptés (liste non limitative) :

- Polystyrène expansé – STISOSOL TH – Certificat ACERMI n° 03/081/061
- Polystyrène expansé – KNAUF XTherm MUR-B2I Rc60 SE – Certificat ACERMI n° 07/007/494
- Mousse rigide de polyuréthane - KNAUF Thane Mur-B2I - Certificat ACERMI n° 10/007/678
- Polystyrène extrudé – K-FOAM C-500 F4 – Certificat ACERMI n° 11/007/724
- Polystyrène expansé – UNIMAT TM SOL SUPRATECH – Certificat ACERMI n° 11/009/723

3.5 Résistance au feu

Appréciation de laboratoire du CSTB n° AL16-176_V2

4 Références

4.1 Données environnementales

Le procédé « Mur GBE® » ne fait pas l'objet d'une Déclaration Environnementale (DE). Il ne peut donc revendiquer aucune performance environnementale particulière.

Les données issues des DE ont notamment pour objet de servir au calcul des impacts environnementaux des ouvrages dans lesquels les procédés visés sont susceptibles d'être intégrés.

4.2 Références chantier

- **Chantier Médiathèque de Frontignan – Frontignan (34)**
 - Maître d'ouvrage : Thau Agglo
 - Date d'exécution : 2013
 - Type de complexe : mur de 42 cm (12 cm peau extérieure / 12 cm isolant / 18 cm voile intérieur)
 - Type de bâtiment : Bâtiment à destination culturelle – Médiathèque (R+2)
 - Entreprise : Arcadi Pla SA
- **Chantier Caves Yves Cuilleron – Chavanay (42)**
 - Maître d'ouvrage : Yves Cuilleron
 - Date d'exécution : 2014
 - Type de complexe : mur de 44 cm (10 cm peau extérieure / 16 cm isolant / 18 cm voile intérieur)
 - Type de bâtiment : Bâtiment industriel - chai
 - Entreprise : Roux Cabrero – groupe Fayat
- **Chantier Logements Les Hauts de Thivel – Tarare (69)**
 - Maître d'ouvrage : Actis
 - Date d'exécution : 2016
 - Type de complexe : mur de 42 cm (10 cm peau extérieure / 16 cm isolant / 16 cm voile intérieur)
 - Type de bâtiment : Bâtiment à usage de logements collectifs -28 logements sociaux collectifs et individuels (R+4)
 - Entreprise : Bertrand Duron Constructeur
- **Chantier Résidence Senghor – Paris (75)**
 - Maître d'ouvrage : ADOMA
 - Date d'exécution : 2017
 - Type de complexe :
 - Mur de 42 cm (10 cm peau extérieure / 16 cm isolant / 16 cm voile intérieur)
 - Mur de 31 cm (10 cm peau extérieure / 7 cm isolant / 14 cm voile intérieur)
 - Type de bâtiment : Bâtiment à usage de logements collectifs - Résidence sociale de 104 logements (R+9)
 - Entreprise : GCC Habitat
- **Chantier Agence au*m architectes– Ecully (69)**
 - Maître d'ouvrage : Agence au*m architectes
 - Date d'exécution : 2017
 - Type de complexe : mur de 43 cm (10 cm peau extérieure / 13 cm isolant / 20 cm voile intérieur)

- Type de bâtiment : Bâtiment de bureaux (R+1)
- Entreprise : Bertrand Duron Constructeur
- **Chantier Campus de l'ENS Cachan - Plateau de Saclay – Gif sur Yvette (91)**
 - Maître d'ouvrage : ENS Cachan
 - Date d'exécution : 2017
 - Type de complexe : mur de 45 cm (10 cm peau extérieure / 17 cm isolant / 18 cm voile intérieur)
 - Type de bâtiment : Bâtiment destiné à l'enseignement universitaire (R+4)
 - Entreprise : Campenon Bernard Construction - groupe Vinci Construction France
- **Chantier Ilot Peugeot (lots B1/B2/B3/C1i) - Grenoble (38)**
 - Maître d'ouvrage : Grenoble Habitat
 - Date d'exécution : 2017
 - Type de complexe : mur de 40 cm (10 cm peau extérieure / 12 cm isolant / 18 cm voile intérieur)
 - Type de bâtiment : Bâtiments à usage de logements collectifs (R+8)
 - Entreprise : Entreprise SDE
- **Chantier Lycée Mounier - Grenoble (38)**
 - Maître d'ouvrage : Région Auvergne Rhône-Alpes
 - Date d'exécution : 2017
 - Type de complexe :
 - mur de 45 cm (10 cm peau extérieure / 14 cm isolant / 21 cm voile intérieur)
 - mur de 55 cm (10 cm peau extérieure / 15 cm isolant / 30 cm voile intérieur)
 - Type de bâtiment : Bâtiment destiné à l'enseignement secondaire (R+3)
 - Entreprise : Eiffage Construction - Isère
- **Chantier Organdi Carré de Soie – Lyon (69)**
 - Maître d'ouvrage : Groupe Cardinal
 - Date d'exécution : 2017
 - Type de complexe : mur de 50 cm (10 cm peau extérieure / 15 cm isolant / 25 cm voile intérieur)
 - Type de bâtiment : Immeuble de bureaux (R+7)
 - Entreprise : S.A. Léon Grosse
- **Chantier Ma Maison – Lyon (69)**
 - Maître d'ouvrage : Petites Sœurs des pauvres
 - Date d'exécution : 2017
 - Type de complexe : mur de 46 cm (12 cm peau extérieure / 14 cm isolant / 20 cm voile intérieur)
 - Type de bâtiment : Bâtiment à usage de logements collectifs - Résidence de personnes âgées (R+3)
 - Entreprise : S.A. Léon Grosse
- **Chantier Centre de secours Nîmes Saint Césaire– Nîmes (30)**
 - Maître d'ouvrage : Service Départemental d'Incendie et de Secours du Gard
 - Date d'exécution : 2018
 - Type de complexe :
 - mur de 45 cm (11 cm peau extérieure / 14 cm isolant / 20 cm voile intérieur)
 - mur de 50 cm (11 cm peau extérieure / 14 cm isolant / 25 cm voile intérieur)
 - Type de bâtiment : Caserne de pompiers (R+1)
 - Entreprise : Berthouly Construction
- **Chantier Ginko Tonga et Samoa - îlot B1.1– Bordeaux (33)**
 - Maître d'ouvrage : Axanis & Aquitanis
 - Date d'exécution : 2018
 - Type de complexe : mur de 38 cm (10 cm peau extérieure / 12 cm isolant / 16 cm voile intérieur)
 - Type de bâtiment : Bâtiments à usage de logements collectifs - Tonga : 41 logements locatifs sociaux & Samoa : 60 logements en accession à la propriété (R+8)
 - Entreprise : EI GCC
- **Chantier Beaux-Arts - Chalucet– Toulon (83)**
 - Maître d'ouvrage : Ville de Toulon
 - Date d'exécution : 2018
 - Type de complexe : mur de 46 cm (10 cm peau extérieure / 16 cm isolant / 20 cm voile intérieur)
 - Type de bâtiment : Bâtiments destinés à l'enseignement supérieur et universitaire - Ecole Supérieure d'Art et de Design Toulon Provence Méditerranée et bureaux (R+8)
 - Entreprise : Travaux du Midi - groupe Vinci Construction France
- **Chantier Médiathèque Chalucet– Toulon (83)**
 - Maître d'ouvrage : Ville de Toulon
 - Date d'exécution : 2018
 - Type de complexe : mur de 56 cm (15 cm peau extérieure / 21 cm isolant / 20 cm voile intérieur)
 - Type de bâtiment : Bâtiment à destination culturelle - Médiathèque (R+2)
 - Entreprise : S.A. Léon Grosse
- **Chantier Groupe Scolaire Antoine de Ruffi– Marseille (13)**
 - Maître d'ouvrage : Etablissement public d'aménagement Euroméditerranée
 - Date d'exécution : 2018
 - Type de complexe : mur de 47 cm (13 cm peau extérieure / 14 cm isolant / 20 cm voile intérieur)
 - Type de bâtiment : Bâtiment destiné à l'enseignement primaire ou secondaire (R+3)
 - Entreprise : Travaux du Midi - groupe Vinci Construction France
- **Chantier Internat 86 au lycée Isaac de l'Etoile – Poitiers (86)**
 - Maître d'ouvrage : Ensemble scolaire Isaac de l'Etoile, enseignement privé catholique
 - Date d'exécution : 2019
 - Type de complexe : mur de 40 cm (10 cm peau extérieure / 14 cm isolant / 16 cm voile intérieur)
 - Type de bâtiment : Bâtiment à usage de logements collectifs – internat (R+2)
 - Entreprise : Moreau Lathus Bâtiment

5 Annexes

Annexe I : Méthodologie de dimensionnement du Procédé GBE – Stabilité

Le fonctionnement mécanique global d'une façade utilisant le Procédé GBE est décrit ci-dessous :

- La paroi externe est destinée à résister aux intempéries et autres agressions d'origine mécanique ;
- En parallèle à la paroi externe, les murs intérieurs assurent la résistance mécanique vis-à-vis des actions internes (exemple : charges d'exploitation) ;
- Le fonctionnement de la structure interne est similaire au cas des bâtiments traditionnels. Sa stabilité est assurée par ses propres composantes (planchers, murs, poutres, poteaux et les fondations), indépendamment de la paroi externe ;
- Les interactions entre la paroi externe et le reste de la structure sont dues à l'isolant, les épingles en acier, les entretoises plastiques et les dagues + connecteurs ;
- Vis-à-vis du comportement hors plan de la paroi externe (vent, séisme), ce sont les épingles en acier qui assurent la transmission des efforts perpendiculaire au plan des façades ;
- La stabilité de la paroi externe (sous action sismique) est assurée par le comportement en plan de chaque façade ;
- Verticalement, le poids de la façade est supporté par les fondations du bâtiment ;
- Vis-à-vis des mouvements différentiels (retrait, thermique, ...) entre la paroi externe et le reste de la structure, la souplesse des épingles et autres connecteurs empêche les concentrations de contrainte dans les éléments participants à la stabilité de la structure (épingles en acier et béton d'ancrage).

1. Evaluation des charges

- **Charges gravitaires** : le poids propre sera pris en compte dans l'étude du mur GBE.
- **Vent** : La pression équivalente du vent s'exerçant sur les parois est calculée selon l'Eurocode 1 partie 4 (NF EN 1991-1-4)
- **Séisme** : En cas d'exigences parasismique il convient de calculer la force sismique, $F_{ah,s}$ calculée selon l'équation 4.24 de la NF EN 1998-1, section §4.3.5.

$$F_{ah,s} = \frac{(S_a W_a \gamma_a)}{q_a} = CS \times m_{elem} \times g$$

$$\text{où } CS = \frac{\gamma_I a_{gR} S}{g} \left[\frac{3 \left(1 + \frac{z}{H}\right)}{1 + \left(1 - \frac{T_a}{T_1}\right)^2} - 0.5 \right] \times \frac{\gamma_a}{q_a}$$

Le coefficient de comportement $q_a = 1$;

Le rapport $\frac{T_a}{T_1} = 1$ de façon à maximiser la force sismique ;

2. Le coefficient d'importance de l'élément $\gamma_a = 1$;

m_{elem} est la masse surfacique de la paroi extérieure = $\rho_b \times \text{épaisseur}$;

La zone de sismicité (avec accélération de site a_{gR}) ;

Le coefficient d'importance attribué à la catégorie d'importance de bâtiment, γ_I ;

Le paramètre de sol, S ;

L'épaisseur de la paroi.

L'Annexe II du Dossier Technique donne à titre indicatif la valeur de F_{ahs} pour 1 mètre de largeur en fonction du coefficient sismique et de l'épaisseur de la paroi.

Les valeurs de l'Annexe II sont données pour toutes les zones sismiques, tous les coefficients d'importance de bâtiment, tous les paramètres des sols et des épaisseurs de paroi variant généralement entre 10 et 15 cm.

Dans le Tableau 2 (§2.4.2.2.2) sont indiquées les valeurs du coefficient sismique CS par lequel multiplier le poids d'un élément non structural pour obtenir la force sismique horizontale appliquée à un élément de façade. Soit :

Pour $q_a = 1$, $\frac{T_a}{T_1} = 1$, et un coefficient d'importance de l'élément $\gamma_a = 1$, on obtient le cas conservateur :

$$CS = 0,56 \times \gamma_I a_{gR} S$$

- **Thermique** : La variation de température à considérer est définie selon l'Annexe Nationale de L'Eurocode 1 Partie 5 (NF EN 1991-1-5/NA, §6.1.3.2)
- **Phase de construction** : Pour assurer la stabilité en phase chantier, en complément des autres dispositions constructives, les recommandations sont données §2.4.1.2.6.

3. Dimensionnement de la structure intérieure

- La structure principale intérieure est une structure en béton armé traditionnel et les dispositions de l'Eurocode 2 partie 1.1 (NF EN 1992-1-1 + annexes nationales) et de l'Eurocode 8 partie 1 (NF EN 1998-1 + annexes nationales) sont applicables (indiqué au §2.4.2.1).

- Les sollicitations hors plan (vent, séisme) appliquées aux parois extérieures sont directement transmises à la structure interne par l'isolant et les différents types de connecteurs, et sont à prendre en compte pour le dimensionnement de la structure interne.

4. Dimensionnement de la paroi extérieure

- Calcul sous charge gravitaire comme indiqué au §2.4.2.2.1 ;
- Calcul sous charges hors plan comme indiqué au §2.4.2.2.2 (des calculs analytiques sont acceptables pour l'étude mécanique sous séisme appliqué perpendiculairement au plan du panneau les hypothèses étant données au §2.4.2.2.2) ;

F_{ah} la valeur maxi des sollicitations sismiques ou de vent = $\text{Max} (F_{ah,s} , F_{ah,v})$;

Calcul du moment sollicitant : $M = F_{ah}L^2/10$

Calcul de la section d'acier nécessaire : $A_a = \frac{M}{(\sigma_{ay} \times z_e)}$ avec $z_e = 0,9 \times \text{épaisseur paroi extérieure} / 2$

A titre indicatif, les valeurs du moment sollicitant et de la section d'acier nécessaire en fonction des configurations des projets (enveloppe des forces de vent et de séisme, épaisseur de la paroi extérieure, distance entre épingles) sont présentées dans les Annexes III et IV.

- Calcul sous charges sismiques dans le plan comme indiqué au §2.4.2.2.2.2 ;
La justification de la tenue mécanique de la paroi soumise à l'action d'un séisme hors plan devra être réalisée par calcul numérique selon un modèle aux éléments finis par analyse modale spectrale.
La suite de la conception est classique selon les Eurocodes, comme pour toute autre structure en béton armé : discrétisation de la paroi par des éléments finis coque ou poutre, calcul des sollicitations (analyse modale spectrale, combinaison CQC des modes) et calcul du ferrailage théorique. La façon dont la modélisation pourrait être réalisée est précisée au §2.4.2.2.2.
- Calcul sous charge provisoire en phase de construction comme indiqué au §2.4.2.2.5 ;
- Mise en place à minima d'un ferrailage courant constitué d'un treillis soude ST25C ou équivalent, d'aciers autour des ouvertures et la mise en place d'un ferrailage majoré localement dans les linteaux comme indiqué au §2.4.2.2.7 et dans l'Annexe XI et établis conformément avec l'Eurocode 2 complété par sa partie 3.

5. Dimensionnement des épingles de liaison

- Calcul comme indiqué au §2.4.2.2.6 avec les paramètres suivants selon les dimensions du panneau $L_{tot} \times H_{tot}$:
 - o Le déplacement maximal u dû à la variation de température : $u_{max} = k_u \times (L_u^2 + H_{tot}^2)^{1/2} \cdot \alpha_{th} \Delta T_{max}$
 - o L_u la taille caractéristique du panneau pour les déplacements thermiques maxi
 - Si bridage en pied : $L_u = \min(L_{tot}/2 ; 2,5 \times H_{tot})$
 - Si bridage 2 bords : $L_u = \min(L_{tot} ; 2,5 \times H_{tot})$
 - Si bridage 3 bords : $L_u = 0$
 - o k_u coefficient de réduction fonction du rapport L_{tot}/H_{tot} du panneau :

Tableau 10 – k_u selon L_{tot}/H_{tot}

L_{tot}/H_{tot}			k_u
1 bord (en pied)	2 bords	3 bords	
≤ 1	$\leq 0,5$	Tous L_{tot}/H_{tot}	100%
2	1		95%
3	1,5		85%
4	2		75%
5 et +	2,5 et +		65%

Note 1 : Les valeurs intermédiaires peuvent être soit interpolées linéairement entre les valeurs du tableau, soit utilisées par palier défavorable. Dans ce dernier cas on aura :

1 bord	2 bords	k_u
$\frac{L_{tot}}{H_{tot}} < 2$	$\frac{L_{tot}}{H_{tot}} < 1$	100%
$2 \leq \frac{L_{tot}}{H_{tot}} < 3$	$1 \leq \frac{L_{tot}}{H_{tot}} < 1,5$	95%
$3 \leq \frac{L_{tot}}{H_{tot}} < 4$	$1,5 \leq \frac{L_{tot}}{H_{tot}} < 2$	85%
$4 \leq \frac{L_{tot}}{H_{tot}} < 5$	$2 \leq \frac{L_{tot}}{H_{tot}} < 2,5$	75%
$5 \leq \frac{L_{tot}}{H_{tot}}$	$2,5 \leq \frac{L_{tot}}{H_{tot}}$	65%

Note 2 : Lors du calcul de l'épaisseur de joints verticaux suivant §2.5.2.10, la valeur de u_{max} à utiliser est $u_{max} = k_u \times L_u \times \alpha_{th} \times \Delta T_{max}$

Note 3 : on utilise en général u_{max} comme valeur enveloppe pour tous les points du panneau, mais des valeurs optimisées pourraient être évaluées selon la distance au centre de dilatation (par exemple différencier les épingles en partie haute et partie basse d'un voile de grande dimension). Dans ces cas, les valeurs de H_{tot} et L_{tot} sont substituées par les distances entre les épingles concernées et le centre de dilatation.

- o Longueur libre minimale des épingles est :

$$L > \sqrt{\frac{3E_a \varphi u_{max}}{\sigma_{ay}}} > \text{Max} \left[20\varphi; \frac{u_{max}}{0,043} \right]$$

- o Si h est la distance entre 2 rangées d'épingles et que e est l'espacement entre épingles, l'effort de compression par épingle qui s'applique sur les épingles s'exprime :

$$N_b = hF_{ah}e$$

- o Le dimensionnement consiste à définir le diamètre, la longueur libre et l'espacement des épingles de sorte que :

$$N_b < \chi \frac{Af_y}{\gamma_{M1}}$$

Avec : $L_{cr} = 0,5(L + 2\varphi)$

et selon l'Eurocode 3 :

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i\lambda_1}$$

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda} - \lambda_0) + \bar{\lambda}^2 \right]$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} < 1$$

- o A titre indicatif, les valeurs des sections d'épingle et de l'espacement des épingles en fonction des configurations des projets (force issue de l'enveloppe des efforts hors plan, distance entre rangées d'épingles, le diamètre et la longueur libre) sont présentées dans l'Annexe VI.

Un exemple de feuille de calculs est présenté ci-après pour faciliter l'utilisation de cette méthodologie.

Le dimensionnement de la paroi extérieure dans son plan est réalisé de manière traditionnelle selon les Eurocode par le bureau d'études structures au niveau des ouvertures (analyse ELU avec combinaisons sismiques, poids propre et thermique, aciers des linteaux).


Il faut vérifier en particulier que les trumeaux les plus chargés (a priori étages inférieurs) ne flambent pas (en retenant une longueur de flambement égale à la hauteur entre lignes d'épingles.)


Les efforts hors plan du panneau permettent :

- D'alimenter le calcul par le bureau d'études du dimensionnement des voiles intérieurs (efforts dus au vent et au séisme)
- La vérification de la stabilité de la paroi extérieure entre lignes d'épingles
- Le dimensionnement des épingles (diamètre, distances entre épingles, longueur libre)

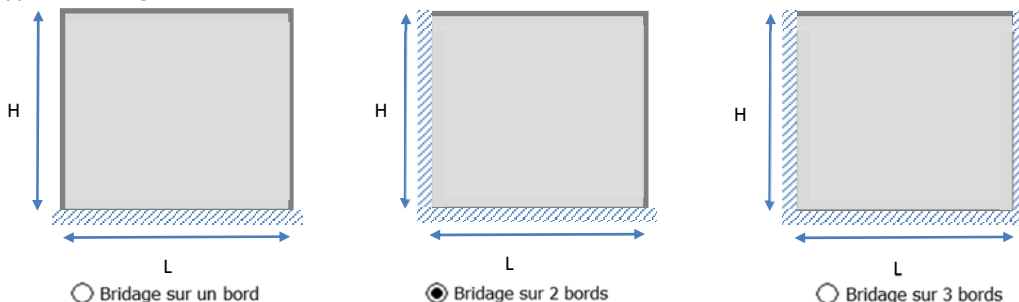
Des aciers de contrôle de la fissuration sous chargement thermique sont évalués.

Description du voile

Hauteur (H) **entre 1 et 28** m 

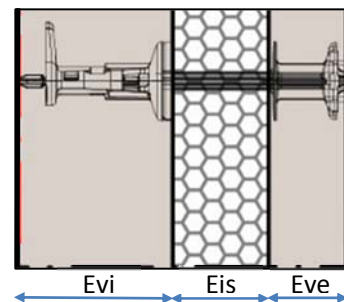
Longueur (L) **entre 1 et 50** m 

Type de bridage du voile extérieur :



Epaisseurs :

Voile intérieur (Evi)	entre 140 et 450	mm
Isolant (Eis)	entre 50 et 340	mm
Voile extérieur (Eve)	≥ 100	mm
Epaisseur totale	$e_{vi} + e_{is} + e_{ve}$	mm



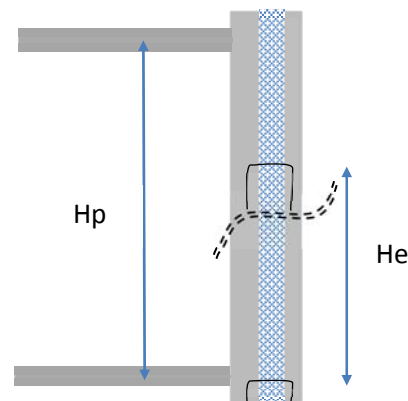
Espacement des planchers et des lignes d'épingles

! épingles en L possible si hauteur entre ligne d'épingles = hauteur entre planchers

! épingles en U possible si enrobage et longueur libre respectés

Hauteur libre entre plancher (Hp) **max 14 m**

Hauteur entre lignes d'épingles (He) **max 6 m**



Sollicitations

Variation de température à considérer selon l'Eurocode 1 Partie 5 (NF EN 1991-1-5/NA)

Température de référence (par défaut 10°C)	18	°C
Température hiver	-30	°C
Température été	50	°C
Variation de température maximale	48	°C



Pression de vent $F_{ah,v}$ selon Eurocode 1 partie 4 (NF EN 1991-1-4)

Pression de vent, $F_{ah,v} = \underline{\hspace{2cm} 500 \hspace{2cm}}$ Pa

Pression $F_{ah,s}$ assimilée à la force sismique calculée selon l'équation 4.24 de la NF EN 1998-1, section §4.3.5

Catégorie d'importance du bâtiment	<input type="text" value="III"/>	$\gamma_l =$ 1.2
Zone sismique	<input type="text" value="3"/>	$agr =$ 1.1
Classe de sol	<input type="text" value="C"/>	$S =$ 1.5

Coefficient sismique = $\gamma_l * agr * S * 0,56$ (cas conservatif)
 CS = 1.11

Force sismique $F_{ah,s} =$ Coefficient sismique \times Wa
 $F_{ah,s} = \mathbf{CS \times \rho_b \times (Eve/1000) \times g}$ N/m²

Contrôle ouvertures de fissures

Ouverture de fissures maxi, $w_k =$ **300** μ m

Propriétés des matériaux

Béton

Classe du béton

C25/30 ▼

Résistance caractéristique en compression	f_{ck}	25	MPa
Résistance moyenne en traction	f_{ctm}	2.6	MPa
Module d'Young Instantané	E_{cm}	31000	MPa
Différé	E_{bd}	10300	MPa
Section fissurée	E_{bf}	15500	MPa
Coefficient de Poisson	ν_b	0	-
Masse volumique	ρ_b	2500	kg/m ³
Coefficient de dilatation	α_{th}	1E-05	°C ⁻¹

Armatures

Treillis et armatures HA

f_y **500** MPa
 E **200 000** MPa

γ_{M0} 1.00
 γ_{M1} 1.15

ϕ_{eq} **7** mm

Diamètre moyen, aciers fissuration

Epingle en acier inoxydable

Acier **HA**
 f_y **500** MPa
 ϵ **0,67**
 η **1**
 E **200 000** MPa
 λ_1 **62,83**
 K_f **0,5**
 λ_0 **0,2**
 α **0,49**

γ_{M0} 1.00
 γ_{M1} 1.00
 γ_{M2}

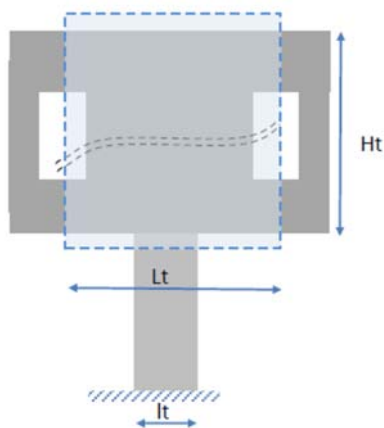
Coefficient de flambement

Elancement réduit limite

Dimensionnement du voile extérieur

Vérification du trumeau le plus chargé – approche simplifiée EC2 §5.8.5

Largeur (l_t) :	300	mm	= largeur du trumeau
Hauteur libre (H_e)	max 6	m	= hauteur entre lignes d'épingles
Section du trumeau	$= l_t \times \frac{e_{ve}}{10^6}$	m ²	
Rayon de giration (hors plan)	$= \frac{\frac{e_{ve}}{1000}}{\sqrt{(12)}}$		
Hauteur tributaire (H_t)	12	m	= Hauteur au-dessus du trumeau
Largeur tributaire (L_t)	3	m	= espacement des trumeaux



Charge de compression N_{Ed}	$= (H_t \times L_t \times \frac{e_{ve}}{10^3}) \times \frac{\rho_b}{10^3}$	kN	
Longueur de flambement l_f	$= 1 \times H_e$	m	
Elancement (< 120)	$\lambda = l_f \times \frac{\sqrt{(12)}}{\frac{e_{ve}}{10^3}}$		
$alpha$	$= SI \left(\lambda < 60; \frac{0,86}{1 + (\frac{\lambda}{62})^2}; (\frac{32}{\lambda})^{1,3} \right)$		
A_s	Section aciers verticaux	cm ²	Au minimum : $2.57 \times l_t$
$N_{rd} (BA)$	$= k_h \times k_s \times alpha \times (\frac{l_t \times e_{ve}}{10^6} \times f_{ck} + \frac{A_s}{10^4} \times \frac{l_t}{10^3} \times f_y / \gamma_{M1}) \times 10^3$	kN	
	OK si $N_{rd} > N_{ed}$		Si NON - modifier la section du trumeau ou la hauteur entre épingle

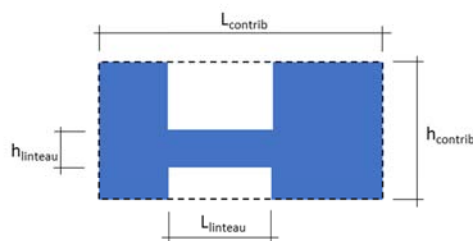
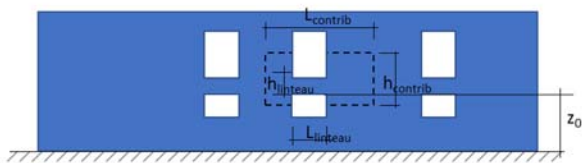
Moment sollicitant entre lignes d'épingles

M_{vent}	$= \frac{F_{ah,v} \times H_e^2}{10}$	N.m
Section d'acier nécessaire A_{vent}	$= \frac{M_{vent}}{\frac{f_y \cdot 10^6}{\gamma_{M1}} \times \frac{e_{ve}}{10^3} \times \frac{0,9}{2}} \times 10^4$	cm ² /m
$M_{séisme}$	$= \frac{F_{ah,s} \times H_e^2}{10}$	N.m
Section d'acier nécessaire $A_{séisme}$	$= \frac{M_{séisme}}{\frac{f_y \cdot 10^6}{\gamma_{M0}} \times \frac{e_{ve}}{10^3} \times \frac{0,9}{2}} \times 10^4$	cm ² /m

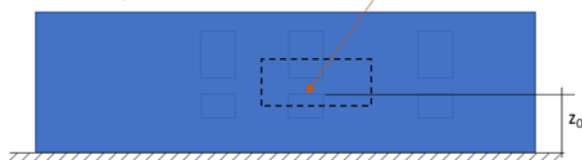
Aciers paroi extérieure

Coefficient bridage linteaux

Mur avec ouvertures



Coefficient de bridage au niveau du bas du linteau z_0 , dans un voile de référence plein : $R_{ax,z0}$

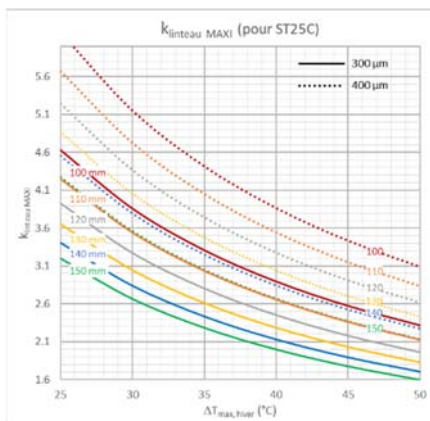
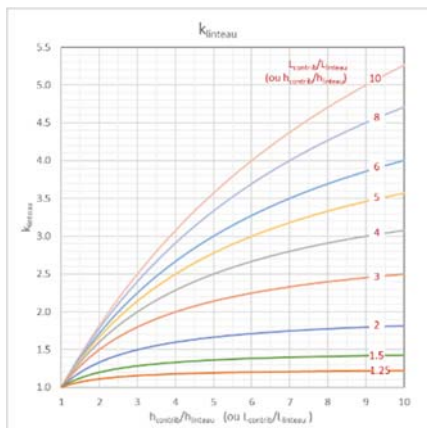


Coefficient de bridage équivalent linteau :

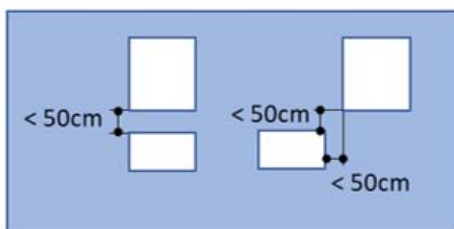
$$R_{eq} = k_{linteau} \cdot R_{ax,z0}$$

$$k_{linteau} = (L_{contrib}/L_{linteau}) / [1 + (h_{linteau}/h_{contrib}) \times ((L_{contrib}/L_{linteau}) - 1)]$$

Les linteaux les plus défavorables sont a priori les linteaux courts dans une zone loin des autres ouvertures



- Dans le cas où $\max(\frac{L_{contrib}}{L_{linteau}}; \frac{h_{contrib}}{h_{linteau}}) > 10$ ou configuration $h_{linteau} < 50$ cm, $A_s = A_{s,max}$ (selon Tableau 7 §2.4.2.2.7)



Configurations $h_{linteau} < 50$ cm à considérer

- Sinon, Si $L_{contrib}/L_{linteau}$ ou $h_{contrib}/h_{linteau} < k_{linteau,MAXI}$ OU si $k_{linteau} < k_{linteau,MAXI}$

$$A_{s,linteau} = 2,57 \quad \text{cm}^2/\text{m} \quad (\text{le ST25C est suffisant})$$

- Sinon ($k_{linteau} \geq k_{linteau,MAXI}$)

$$R_{eq} = k_{linteau} \cdot R_{ax,z0}$$

$R_{ax,z0}$ coefficient de bridage selon l'EC2 partie 3 annexe L figure L.1, à la position du bas du linteau dans un voile plein de référence.

Si bridage sur les bords, bridage horizontal : $R_{ax,0} = 0.5$

Tableau L.1 — Facteurs de bridage pour la partie centrale des parois illustrée à la Figure L.1

Rapport L/H (voir Figure L.1)	Facteur de bridage à la base	Facteur de bridage en tête
1	0,5	0
2	0,5	0
3	0,5	0,05
4	0,5	0,3
> 8	0,5	0,5

Si libre sur les bords, interpolation linéaire du bridage dans le tableau suivant L.1 de l'Eurocode 2 partie 3 annexe L selon :

- z_0 (altitude bas du linteau)
- L/H

Aciers horizontaux dans les linteaux :

$$A_{s,\text{lindeau}} = \text{Min} \left(\frac{3,4 \times \phi_{eq} \times e_{ve}}{\left[\frac{\frac{w_k}{10^3}}{R_{eq} \times (0,5 \cdot \alpha_{th} \cdot \Delta T_{max})} - 110 \right]} ; 10 \times e_{ve} \times \frac{f_{ctm}}{f_y} \right) \quad \text{cm}^2/\text{m}$$

Sur tout le panneau extérieur

ST25C ou équivalent, placé sur le feuillet moyen :

$$\text{Acier}_{\min} = \mathbf{2,57} \quad \text{cm}^2/\text{m}$$

Autour des ouvertures :

$$\text{Horizontal} = \mathbf{0,8} \quad \text{cm}^2 \quad \text{en haut et en bas}$$

$$\text{Vertical} = \mathbf{0,68} \quad \text{cm}^2 \quad \text{de chaque côté}$$

Complément zones linteaux

$$\text{Max} (A_s ; 2,57) - 2,57 \quad \text{cm}^2/\text{m}$$

Les aciers autour des ouvertures peuvent être comptées comme complément

Compléments verticaux

$$\text{Max} (A_{vent} ; A_{seisme} ; 2,57) - 2,57 \quad \text{cm}^2/\text{m}$$

Dimensionnement des épingles*Sections des épingles*

Diamètre mm	I mm ⁴	S mm ²	i mm
4	12,57	12,57	1,00
5	30,68	19,63	1,25
6	63,62	28,27	1,50
8	201,06	50,27	2,00
10	490,87	78,54	2,50

Calcul de la longueur libre minimale

Déplacement max sous charge thermique

$$u_{max} = k_u (L_u^2 + H^2)^{\frac{1}{2}} \alpha_b \Delta T_{max} \quad \text{mm}$$

	Bridage 1 bord	Bridage 2 bords	Bridage 3 bords	k_u
L/H	≤ 1	$\leq 0,5$	Tout L/H	100%
	2	1		95%
	3	1,5		85%
	4	2		75%
	5 et +	2,5 et +		65%
L_u	Min ($L/2 ; 2,5 \times H$)	Min ($L ; 2,5 \times H$)	0	

Longueur libre (non-plastification)

diamètre épingle	Longueur min	en U	en L
4	$\text{Max} \left[\frac{L_{min} \geq \sqrt{\frac{3E_a \phi_{u\max}}{\sigma_{ay}}}} ; 20\phi ; \frac{u_{max}}{0,043} \right]$	$L_{min} < e_{vi} - 50 + e_{iso} - 3\phi$	$\text{OK SI } H_e = H_p$
5			
6			
8			
10			

Capacité des épingles en compression

- Si h est la distance entre 2 rangées d'épingles et que e est l'espacement entre épingles, l'effort de compression par épingle qui s'applique sur les épingles s'exprime :

$$N_b = h F_{ah} e$$

- Le dimensionnement consiste à définir le diamètre, la longueur libre et l'espacement des épingles de sorte que :

$$N_b < \chi \frac{A f_y}{\gamma_{M1}}$$

Avec : $L_{cr} = 0.5(L + 2\varphi)$

et selon l'Eurocode 3 :

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i \lambda_1}$$

$$\phi = 0.5 [1 + \alpha(\bar{\lambda} - \lambda_0) + \bar{\lambda}^2]$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} < 1$$

diamètre épingle (φ)	Lg libre (mm)	Lcr (mm)	λ	ϕ	χ	$N_{b,Rd,e}$ (kN)
4	L	= 0.5(L + 2φ)	$\frac{L_{cr}}{i \lambda_1}$	$0.5 [1 + \alpha(\bar{\lambda} - \lambda_0) + \bar{\lambda}^2]$	$\frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$ < 1	$\chi \frac{A f_y}{\gamma_{M1}}$
5						
6						
8						
10						

Force par ligne d'épingles

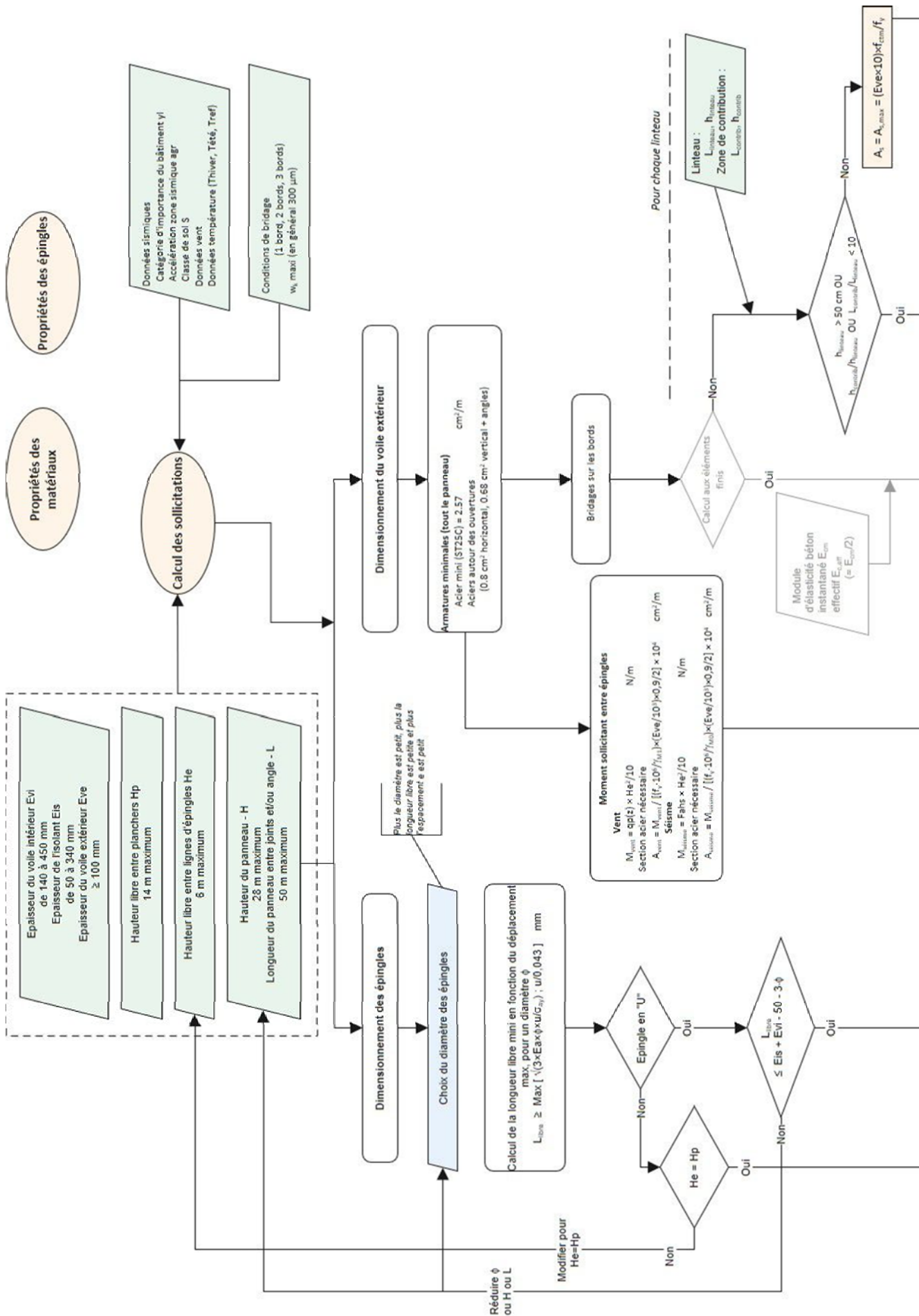
$$N_{b,Ed\ tot} = H_e \times F_{ah,max} \quad \text{kN/ml}$$

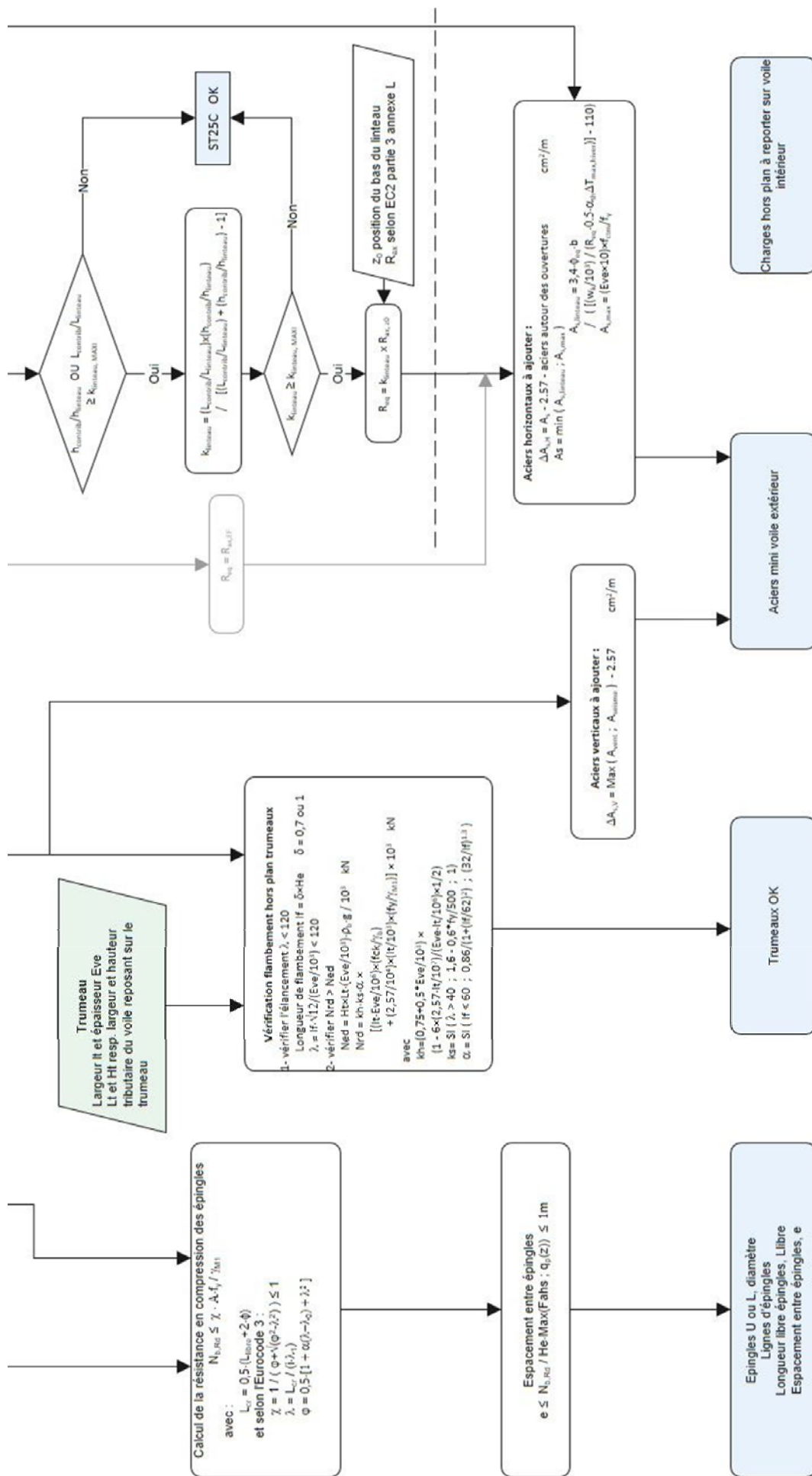
Espacement des épingles (efforts hors plan)

Diamètre épingle	e (cm)	tx (cm ² /ml)
4	$= \frac{N_{b,Ed\ tot}}{N_{b,Rd,e}}$	= 100 x A / e
5		
6		
8		
10		

Choix final

Diamètre épingle φ = 4 à 10 mm
 Hauteur entre lignes d'épingles H_e m
 Espacement entre épingles e cm
 Longueur libre L mm
 en U : OK si $L_{min} < e_{vi} - 50 + e_{is} - 3\varphi$
 en L : OK si $H_e = H_p$





Propriétés des matériaux

Béton

Résistance caract. en compression f_{ck} MPa
 Résistance moyenne en traction f_{ctm} MPa
 Module de Young instantané E_{cm} MPa
 Module élastique E_{el} MPa
 Module section fissurée $E_{s,f}$ MPa
 Coefficient de Poisson ν_k -
 Masse volumique ρ_k kg/m³
 Coefficient de dilatation α_{th} °C⁻¹
 Coefficient partiel γ_k -

Acier et treillis armatures

f_y 500 MPa
 E 200 000 MPa
 γ_{wo} 1,00 -
 γ_{rel} 1,15 -

Acier inoxydable et Épingles

f_y 500 MPa
 E 200 000 MPa
 γ_{wo} 1,00 -
 γ_{rel} 1,00 -

Propriétés des épingles

Diamètre	I	A	i
mm	mm ⁴	mm ²	mm
4	12,5	12,6	1,00
5	31	20	1,25
6	64	28	1,50
8	201	50	2,00
10	491	79	2,50

Flambement des épingles

$\epsilon = \sqrt{[(235/f_y) \times (E/200\,000)]}$

$\eta = 1$

$\lambda_1 = \pi^2 / (\epsilon \cdot f_y)$

$k_f = 0,5$ coefficient de flambement

$\lambda_D = 0,2$ élanement réduit

$\alpha = 0,49$

Calcul des sollicitations

Pression de vent à l'altitude z=H du voile selon Eurocode 1 partie 4 (NF EN 1991-1-4)
 F_{wh} (ou $q(z)$) N/m²

Catégorie d'importance du bâtiment γ_I
 Accélération zone sismique a_{gr}
 Classe de sol S

Catégorie de bâtiment, γ_I	Zone sismique	a_{gr} (m/s ²)	Classe sol	S
I	1	0,4	A	1,0
II	2	0,7	B	1,35
III	3	1,1	C	1,5
IV	4	1,6	D	1,6
	5	3,0	E	3,0

Coefficient sismique $CS = \gamma_I \times a_{gr} \times S \times 0,56$

Force sismique assimilée à la force sismique calculée selon l'équation 4.24 de la NF EN 1998-1, section 4.3.5
 $F_{wh} = CS \times \rho_w \times g \times Eve / 100$ N/m²

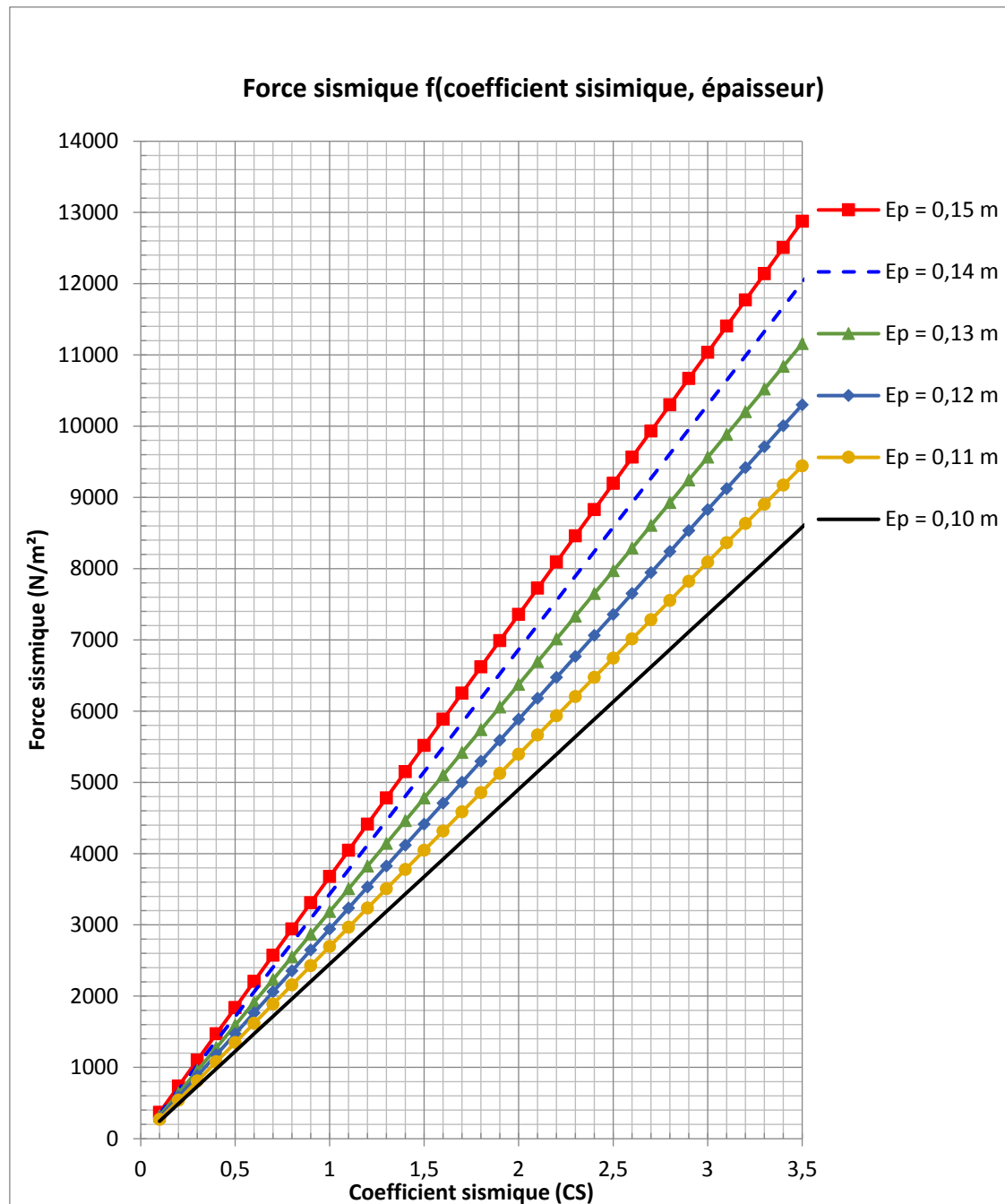
Température été et hiver selon Tableau EC1-5 (NA)
 Température de référence, T_{ref}
 10°C par défaut selon EC1-5 (NA), clause A.1(3)

Variation de température à considérer selon l'Eurocode 1 Partie 5 (NF EN 1991-1-5(NA))
 $\Delta T_{max} = \{ \Delta T_{max,100\%}; \Delta T_{max,95\%} \}$

L/H	Bridage			k_e
	1 bord	2 bords	3 bords	
≤ 1	$\leq 0,5$	\forall L/H		100%
2	1			95%
3	1,5			85%
4	2			75%
≥ 5	$\geq 2,5$			65%

Déplacement maxi sous charge thermique
 $u_{max} = k_e \cdot \sqrt{(L_e^2 + H^2)}$
 Bridage 1 bord : $L_e = \text{Min}(L/2; 2,5 \cdot H)$
 Bridage 2 bords : $L_e = \text{Min}(L; 2,5 \cdot H)$
 Bridage 3 bords : $L_e = 0$

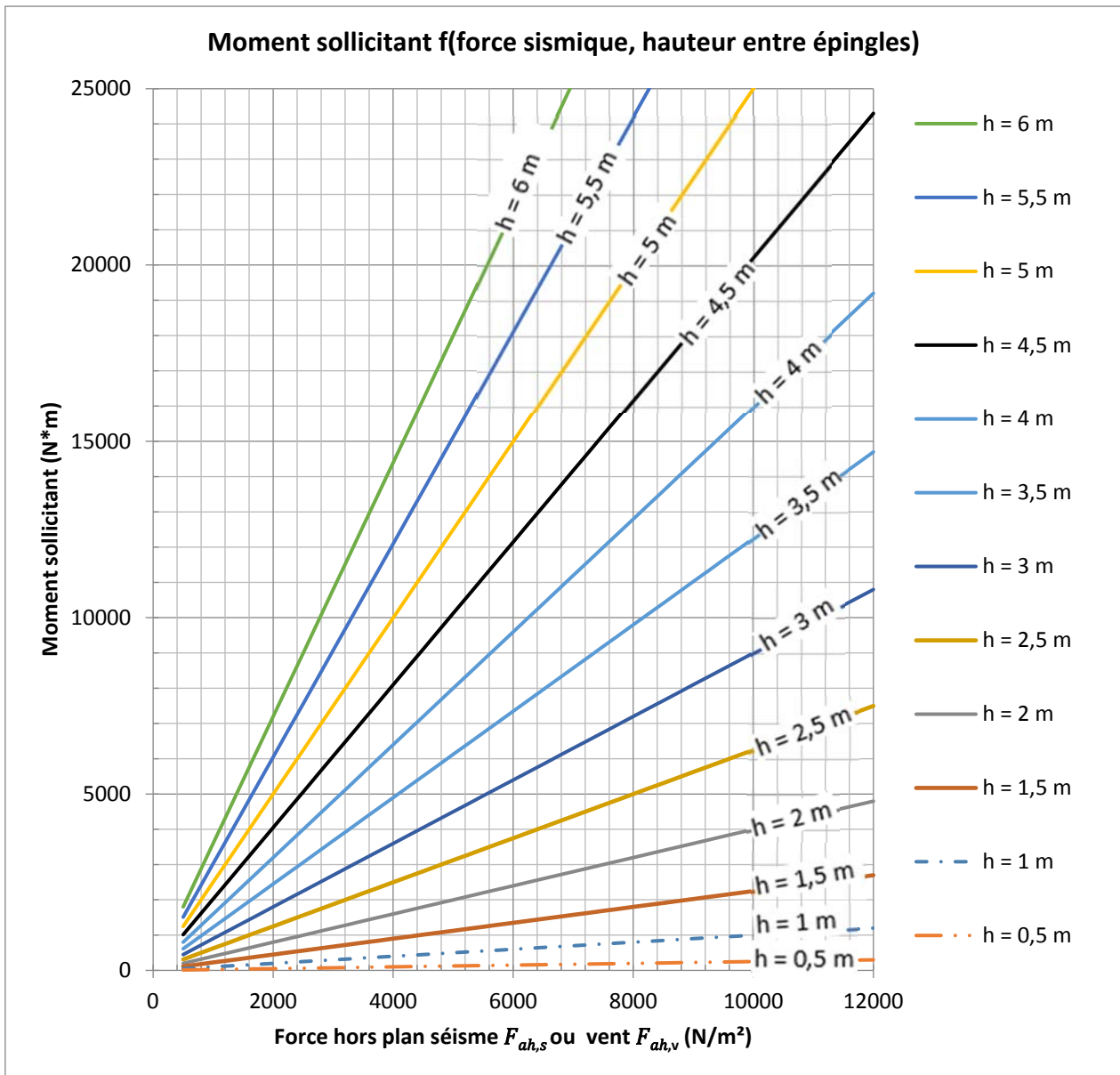
Annexe II : Force sismique F_{ah} (en N/m^2) en fonction du coefficient sismique (CS) et de l'épaisseur de la paroi extérieure



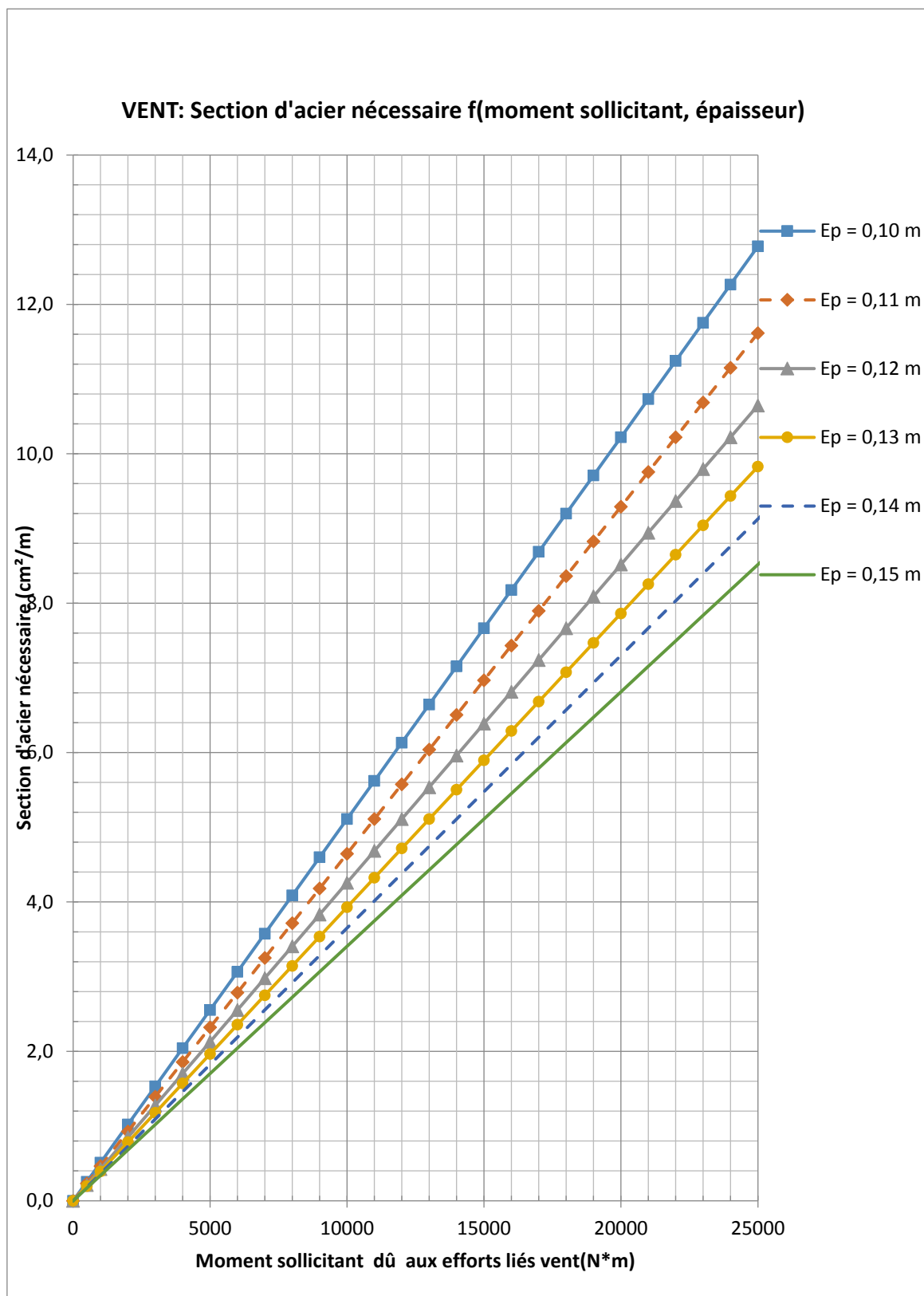
A titre d'exemple, pour un bâtiment de catégorie d'importance III en zone de sismicité 3 et sans information sur la classe de sol, on retient le coefficient sismique de 1,33. Cela conduit à une force sismique horizontale pour une paroi extérieure de 100 mm de :

$$F_{ah,s} = 1,33 \times (100 / 10^3) \times 2500 \times 9,81 = 3\,262 \text{ N/m}^2$$

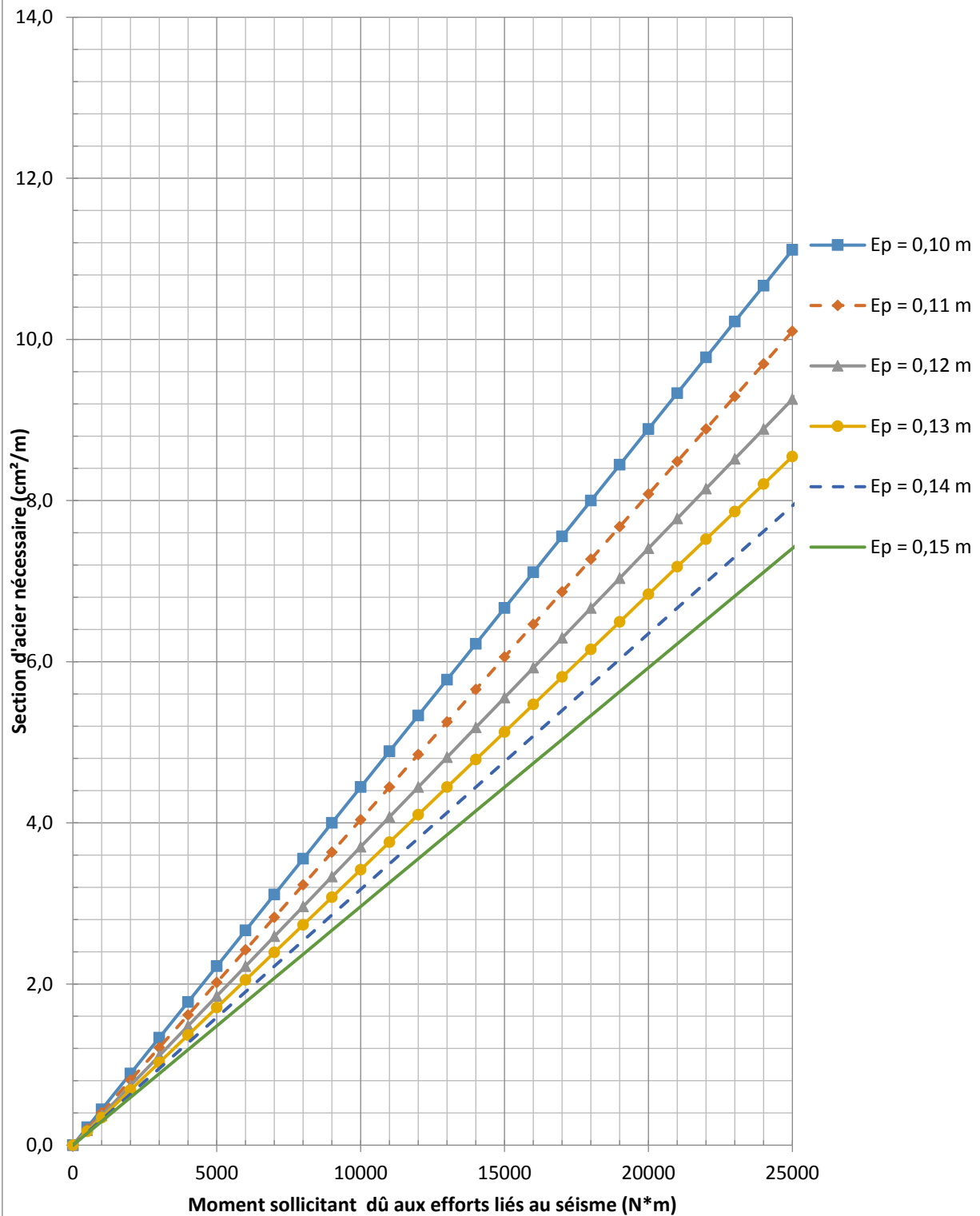
Annexe III : Moment sollicitant M (en N*m) en fonction de la force sismique ou de vent et de la hauteur entre les épingles



Annexe IV : Section d'acier nécessaire Aa (en cm²/m) en fonction du moment sollicitant et de l'épaisseur de la paroi



SEISME : Section d'acier nécessaire f(moment sollicitant, épaisseur)



Annexe V : Comportement sous charges de construction (en complément de la section)

La paroi extérieure du système GBE est modélisée comme une poutre de dimensions 1000 x ép. de la paroi ext. mm², elle est appuyée en pied et au niveau des entretoises plastiques.

Deux configurations sont étudiées afin de déterminer le moment maximal produit par l'appui des passerelles consoles en phase chantier :

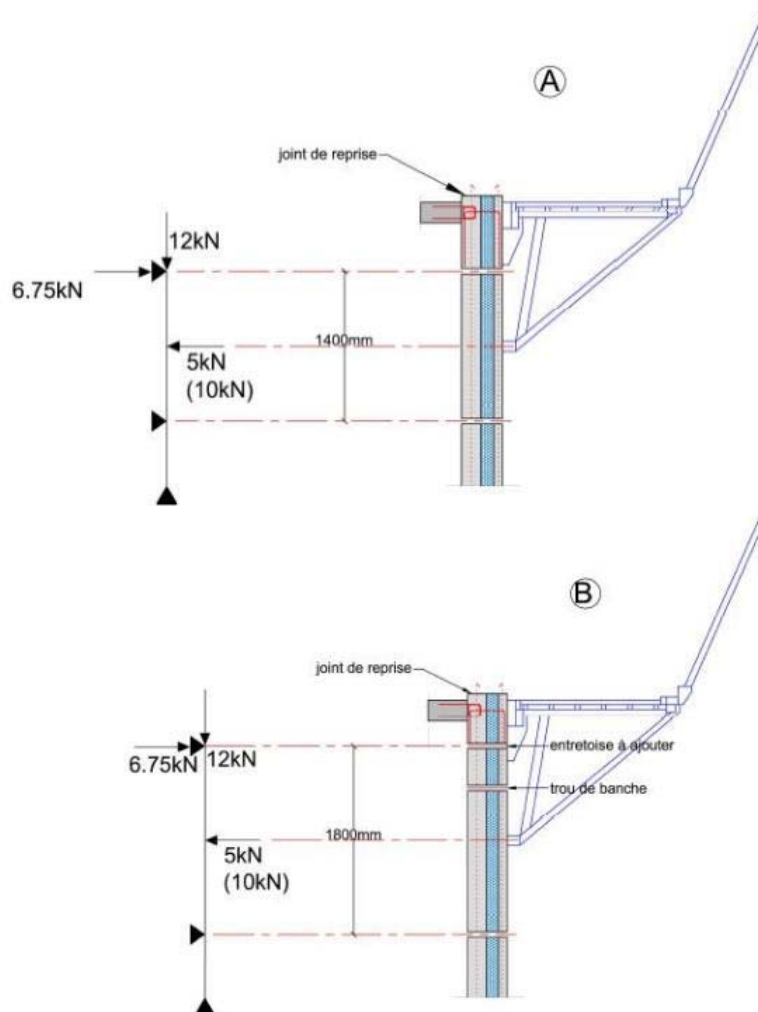
- Cas A - passerelle console appuyée sur entretoise au niveau des tiges de serrage
- Cas B - passerelle console appuyée sur entretoise positionnée en tête de voile

La portée libre est légèrement supérieure dans le cas B (1,8 m).

Le calcul est réalisé pour un béton ayant une résistance de calcul à 7 jours $F_{cd} = 13,3$ MPa, (il convient d'appliquer un coefficient de sécurité 1,5 à $F_{ck} = 20$ MPa pour obtenir la résistance de calcul).

Nous considérons l'appui du mur comme un point rigide dans le cas du RDC, il devient une rotule à partir du R+1. De plus la force horizontale de 5 kN s'exerçant dans cet exemple sur la paroi est doublée afin de tenir compte d'une non-continuité de la zone d'appui de la paroi (ouverture pour fenêtre par exemple). Elle est donc de 10 kN dans cette étude.

Figure 10 – Configurations de calcul de la paroi extérieure en phase chantier



Les données de calculs pour la descente des charges des passerelles de chantier doivent être issues de la documentation technique des banches et passerelles (voir Fig. 10 ci-dessous).

La résistance moyenne obtenue lors des tests mécaniques (3 essais) réalisés sur les entretoises est de $N_{moy} = 32$ kN (voir § 3.1 du rapport d'essais mécaniques du système GBE, réalisés pour des longueurs libres de 20 et 35 cm) avec un coefficient de variation V de 0,92. La valeur de résistance de calcul est alors de $N_{Rd} = \frac{N_{max} - 3,37 \times V}{1,5} = 19,2$ kN qui doit être supérieure à la force sollicitante.

Figure 11 – Descente de charges passerelle de chantier

Descente de charge: données de calcul

Qv=60daN/m² pour un Vent: 85Km/h
 P1: Surcharge de circulation: 150daN/m
 P3: Poids des banquettes: 180daN/m²
 B: Position banquette / voile: 0.2m
 Autres données: voir tableau précédent.

Calcul des réactions:

$$R_v \text{ attache} = \frac{R_v \times L}{\text{Nbr d'attache}}$$

$$R_h \text{ attache} = \frac{R_h \times L}{\text{Nbr d'attache}}$$

$$R_u \text{ ferme} = \frac{R_u \times L}{\text{Nbr de fermes}}$$

Légende:

Nbr: Nombre
 L: Longueur de la plateforme

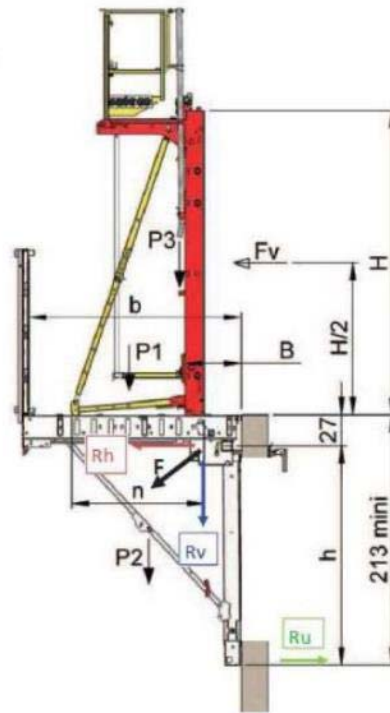
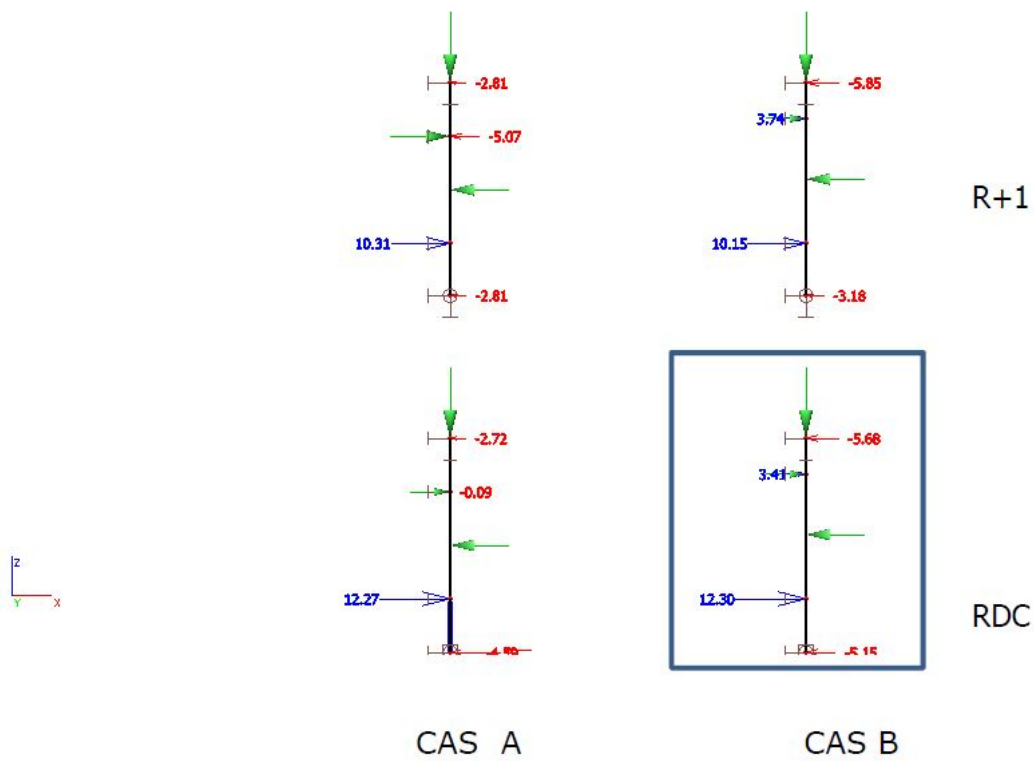
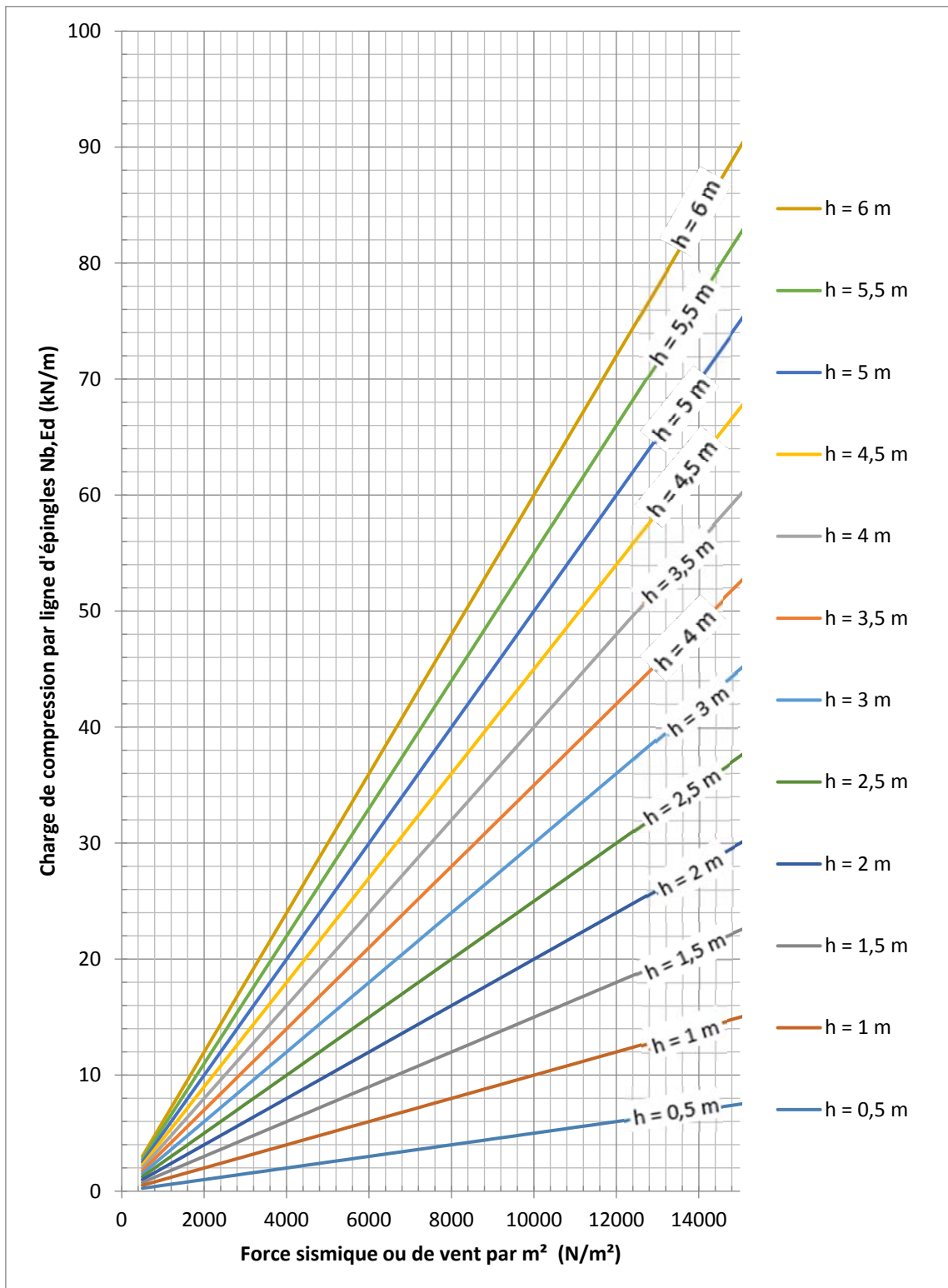


Figure 12 – Réactions R_x dans la paroi extérieure en phase chantier

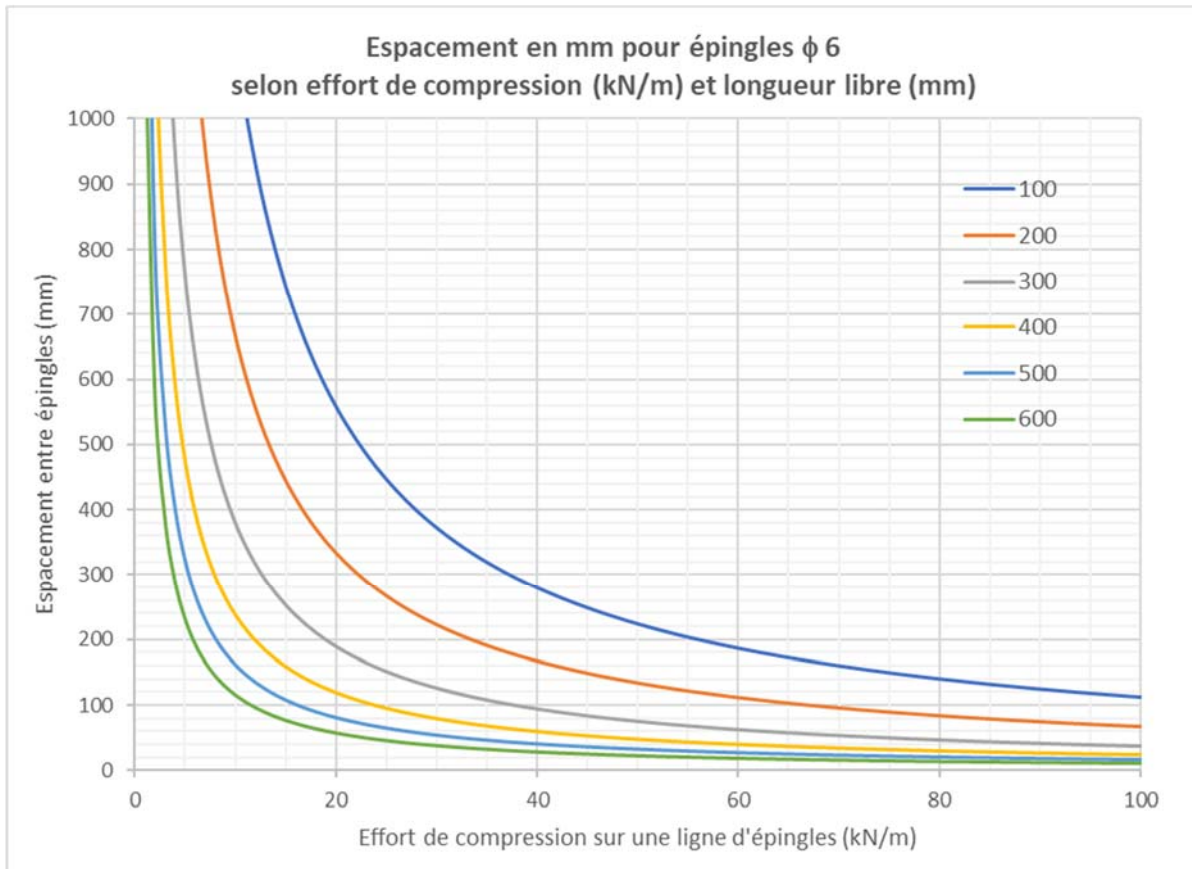
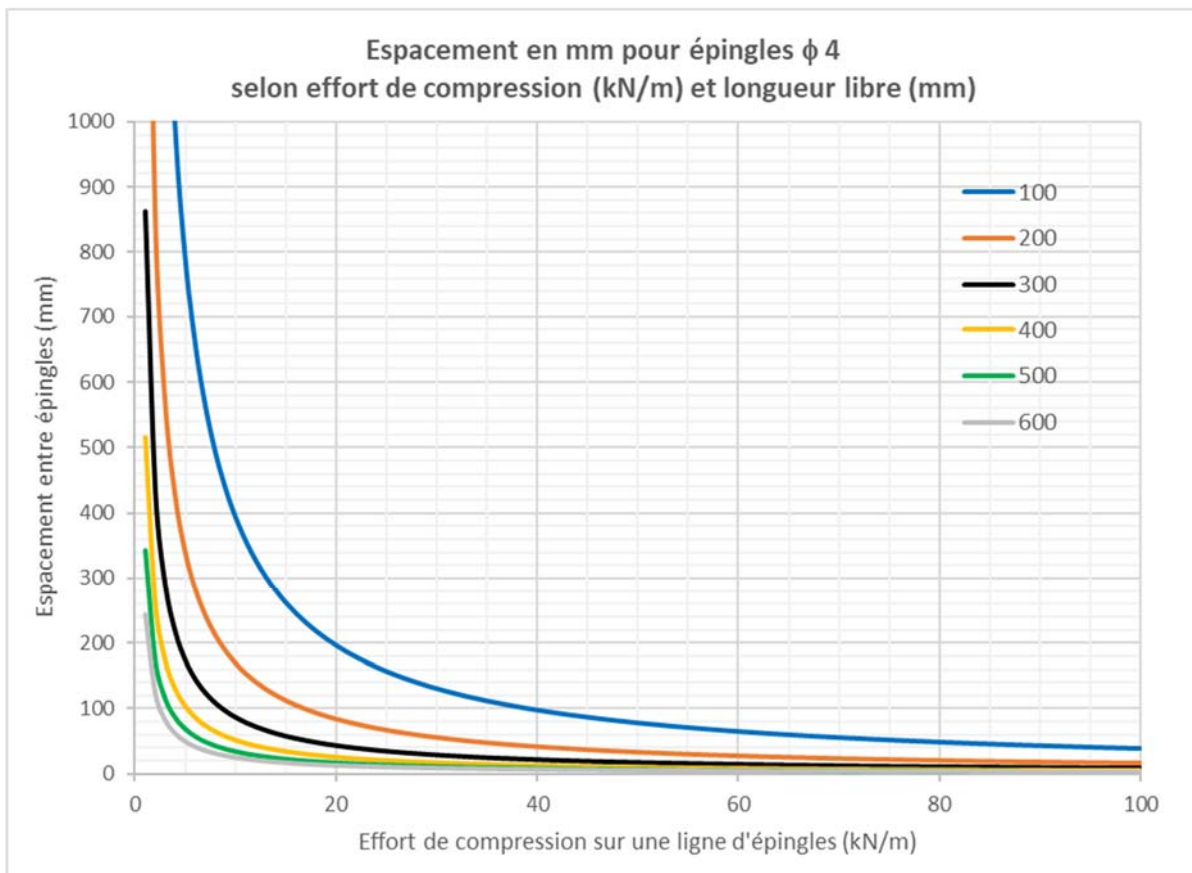
EFFORTS

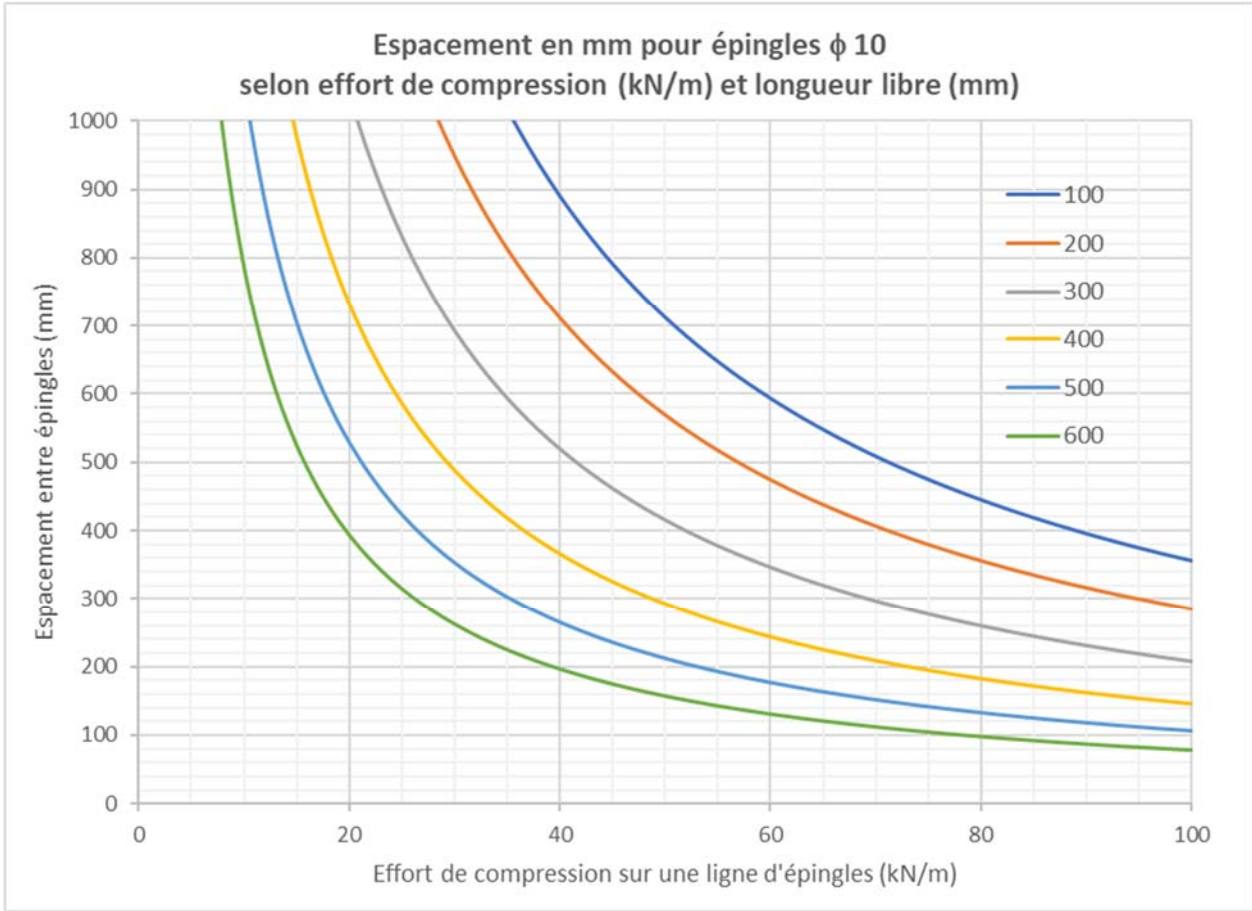
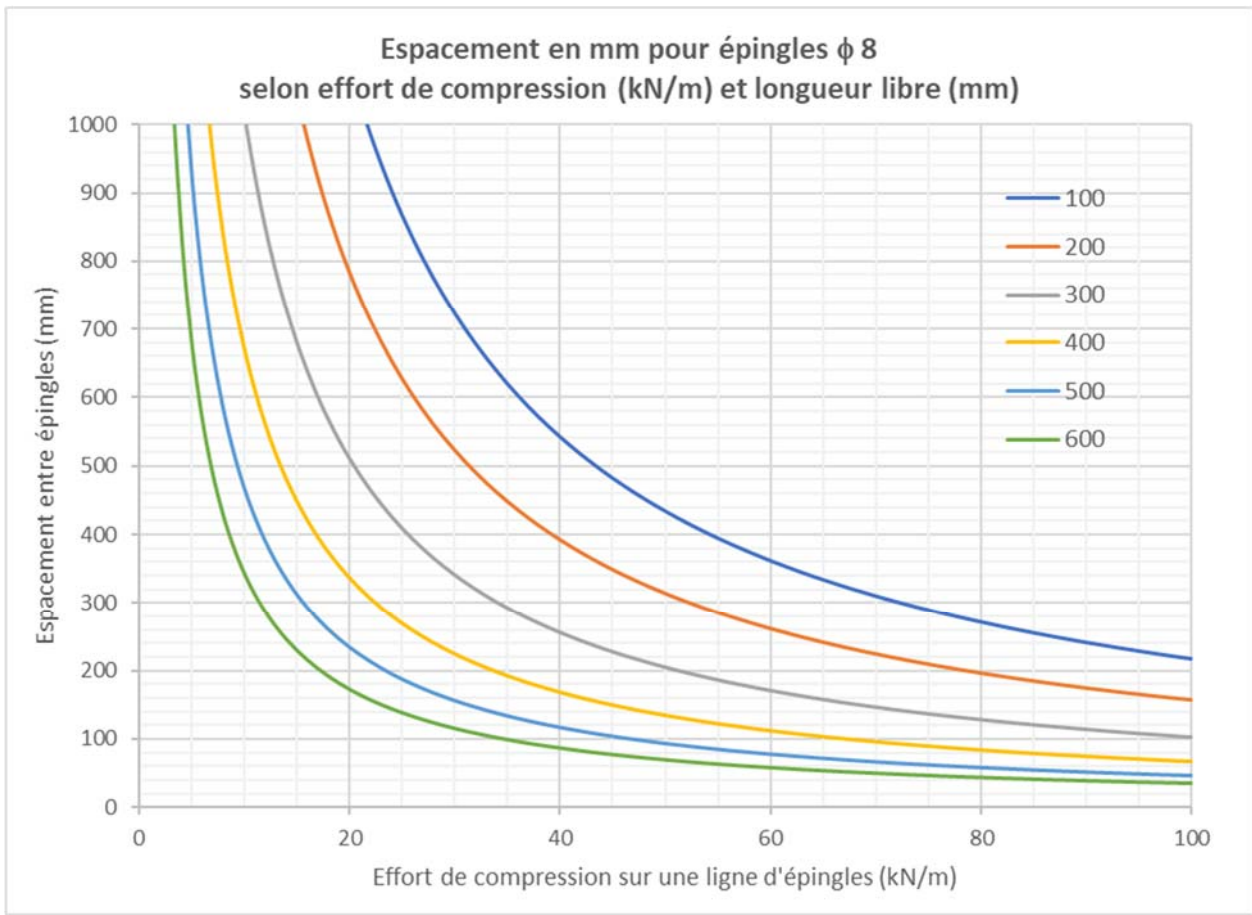


Annexe VI : Charge de compression appliquée sur les épingles $N_{b,Ed}$ (kN/m) en fonction de la force F_{ah} et de la hauteur entre les épingles (en U ou en L)

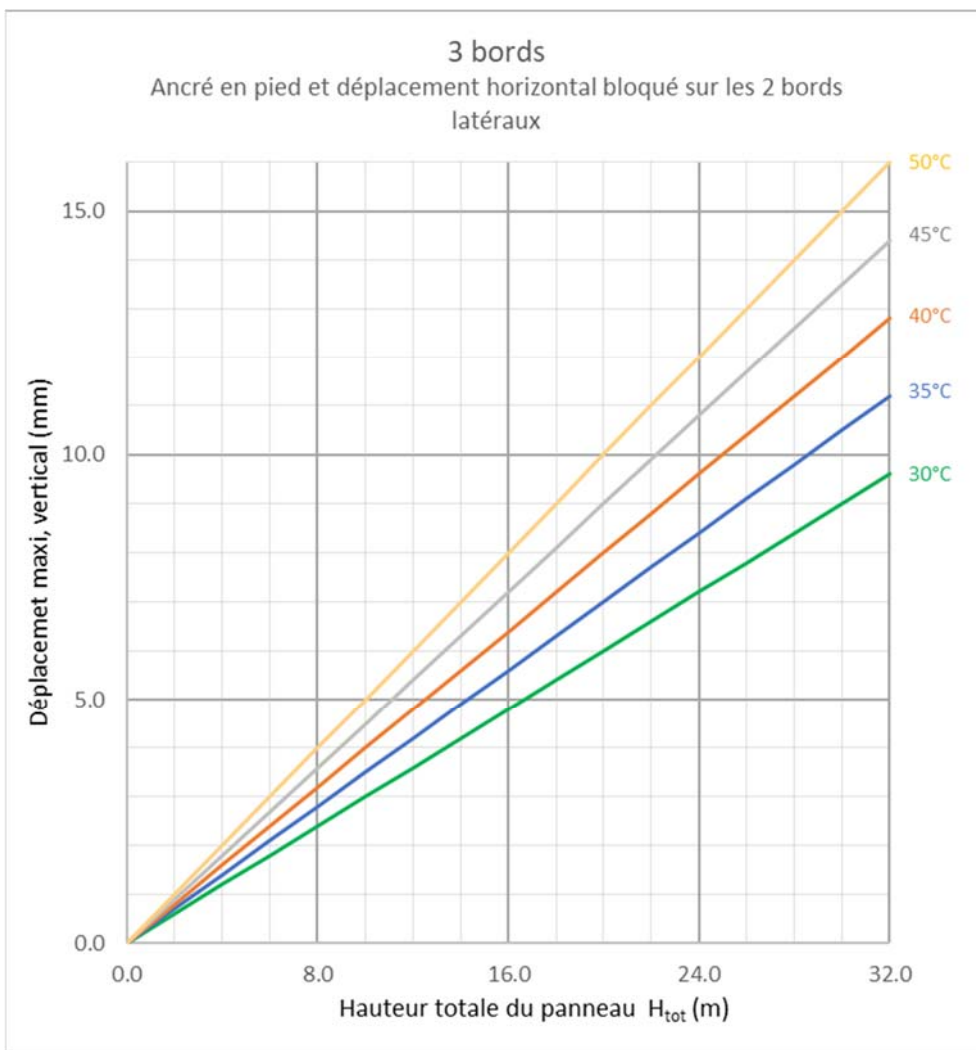
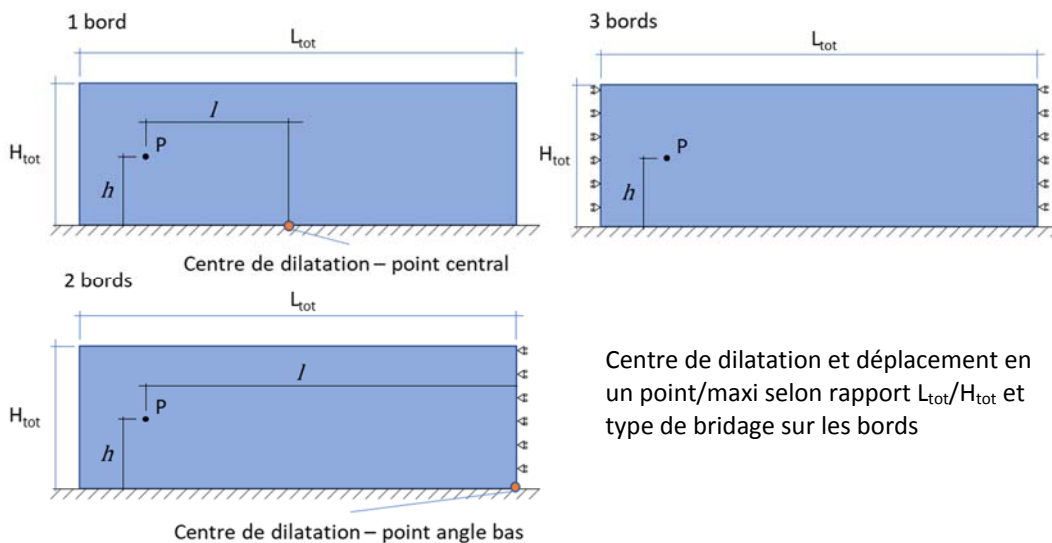


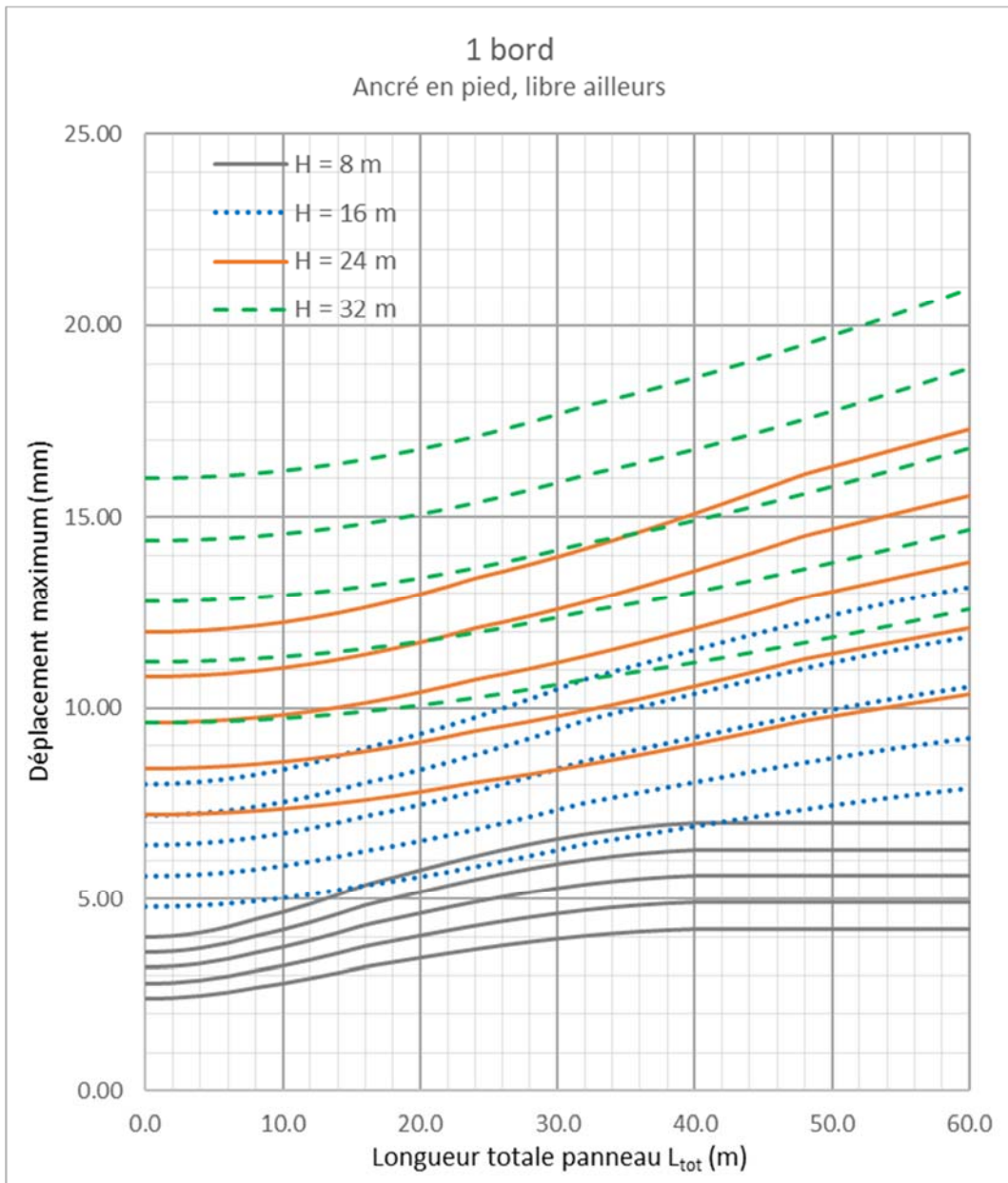
Annexe VII : Abaques pour le dimensionnement des épingles en compression (Épingles en U ou en L)

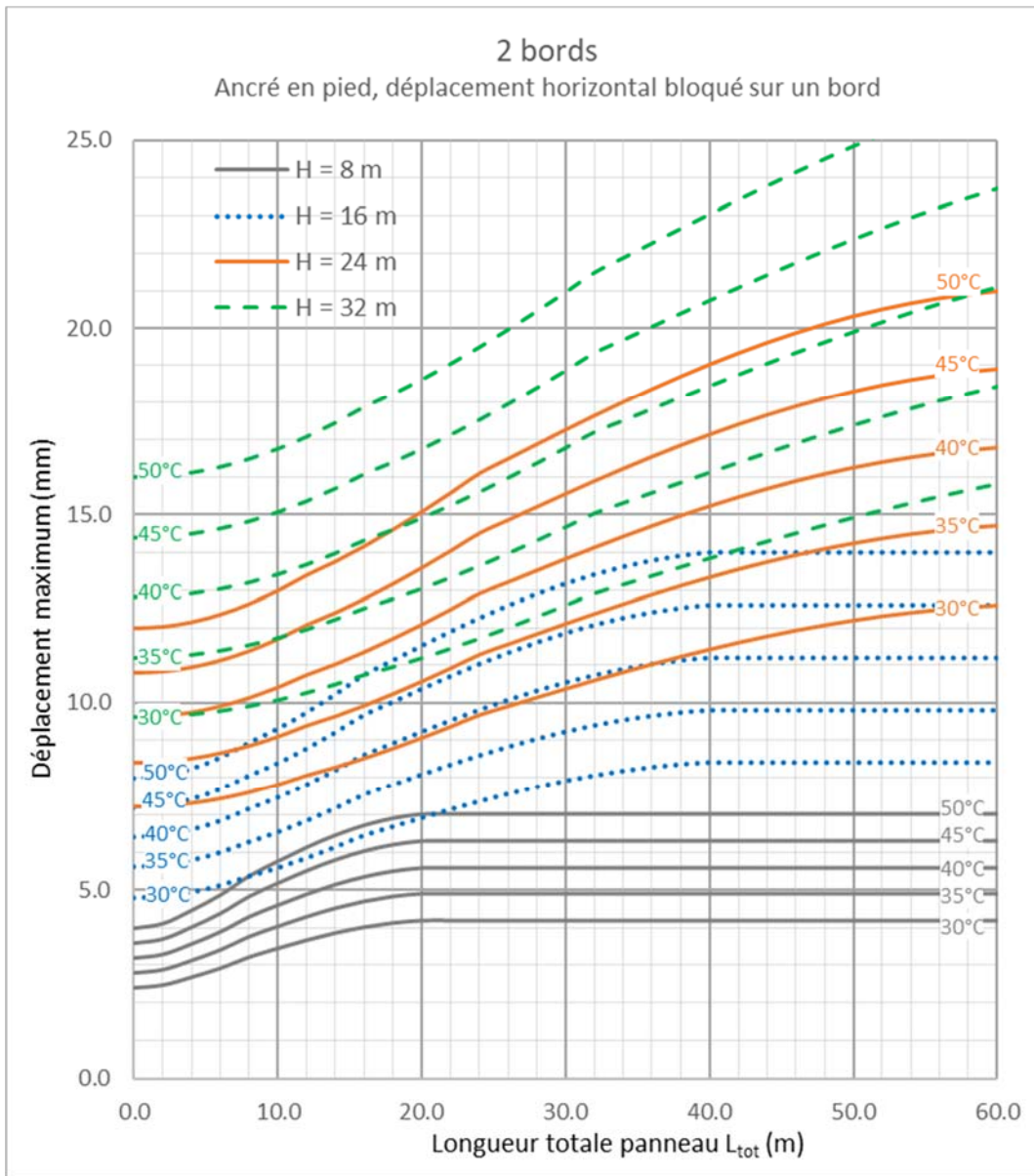




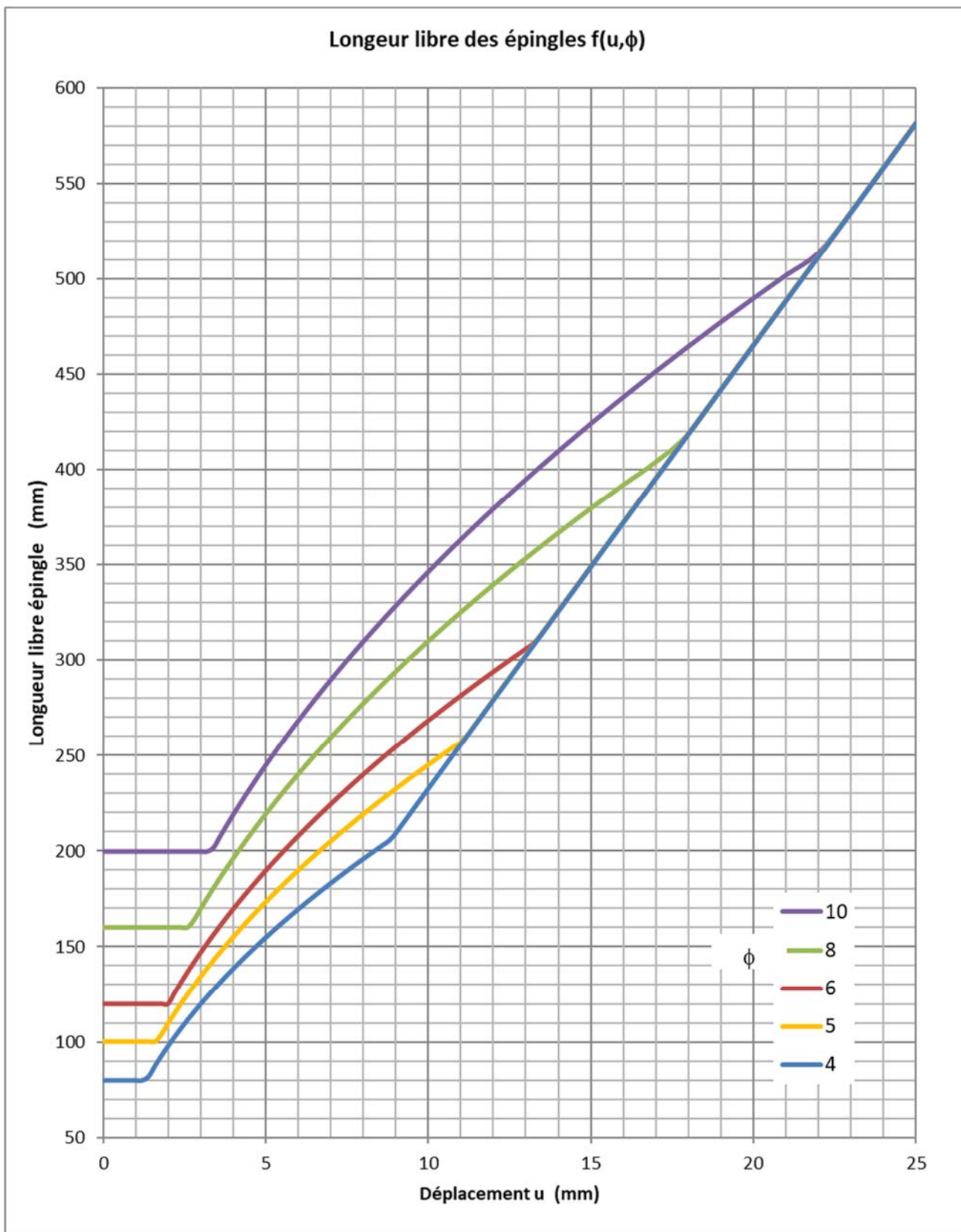
Annexe VIII : Déplacement maximal (en mm) en fonction du gradient de température ΔT et de la distance



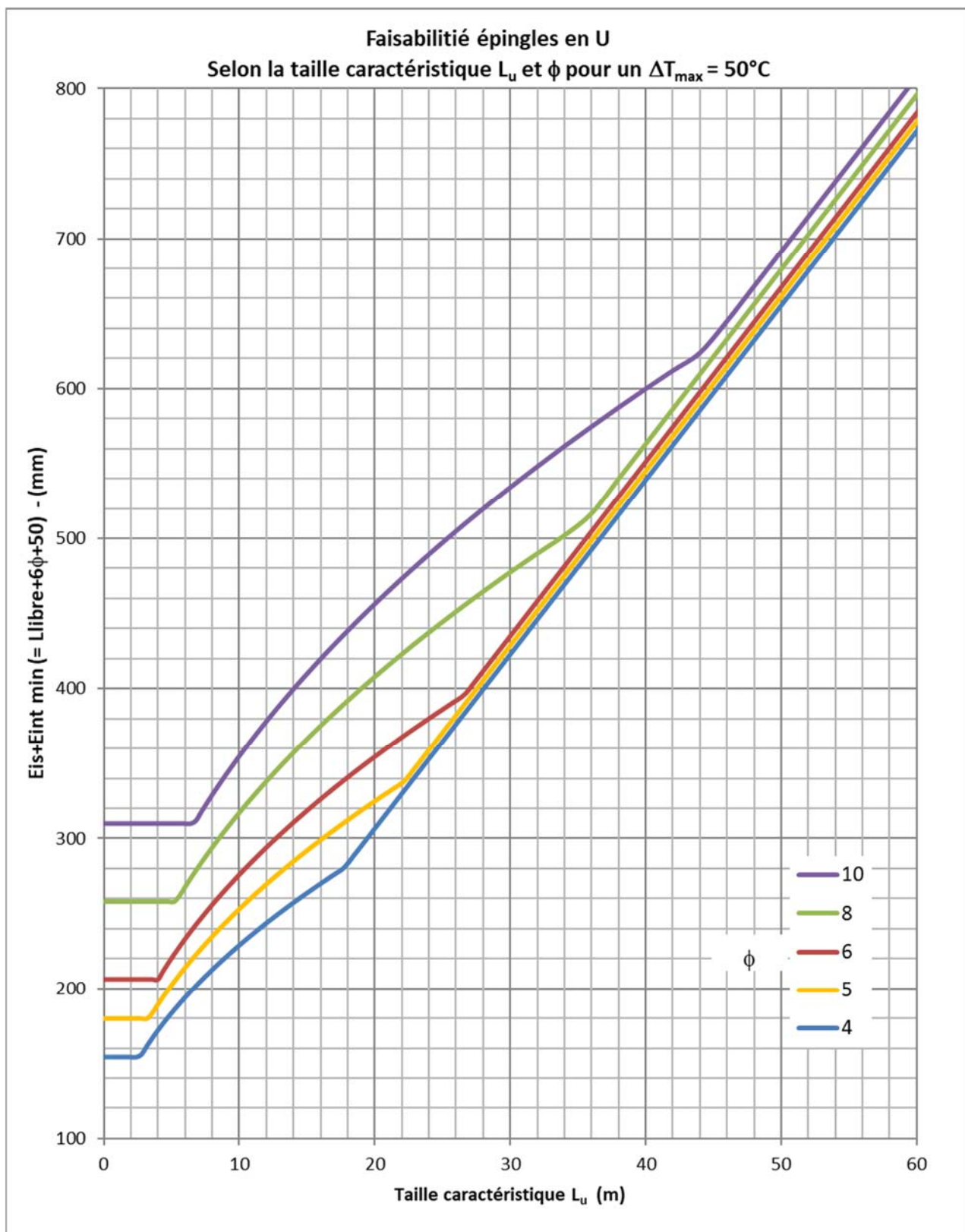




Annexe IX : Longueur libre des épingles (en cm) en fonction du déplacement u et du diamètre ϕ (épingles en U ou en L)



Annexe X : Epaisseur minimale (voile intérieur + isolant) permettant la mise en place d'épingles en U en fonction de la distance maximale de dilatation thermique pour une variation de température de $\Delta T = 50\text{ °C}$



Annexe XI : Contrôle de l'ouverture des fissures

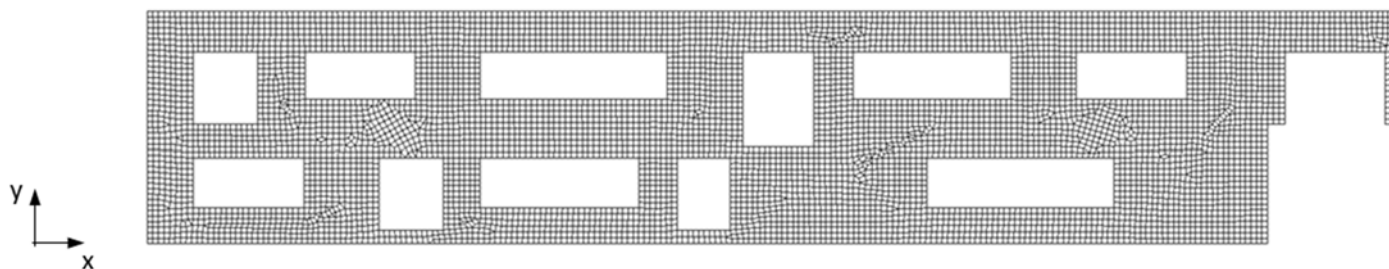
Les armatures minimales à mettre en œuvre pour limiter les risques de fissuration dans le voile extérieur peuvent être calculées selon la méthode présentée dans la section 2.4.2.2.7.

De manière alternative et cohérente, la cartographie des coefficients de bridages (et donc des besoins en acier mini pour le contrôle de la fissuration) des voiles extérieurs du procédé GBE peut être réalisée directement par un calcul aux éléments finis selon les recommandations de l'Eurocode 2 partie 3.

Le voile est modélisé par des éléments coque (éléments linéaires à 3 ou 4 nœuds de type DKT par exemple). La discrétisation dépend du projet mais des mailles de 0,2 m sont généralement acceptable pour des voiles de façade (on cherche à avoir au moins 2 à 3 mailles dans chaque zone singulière).

La figure suivante illustre un exemple de maillage sur une façade de L= 30 m x H=28 m.

Figure 13 – Maillage type pour calculs aux éléments finis des coefficients de bridage



Le calcul mécanique suppose des contraintes planes et un comportement élastique avec un module $E_{c,eff}$.

Les conditions limites (déplacements bloqués) sont imposées là où il est requis :

Ancré en pied (a priori) : déplacement horizontal et déplacement vertical = 0

Sur les bords latéraux : soit libre, soit déplacement horizontal = 0

Autres ancrages possibles : si présence de bandes noyées ou de consoles de reprise.

Le chargement se limite à une déformation uniforme ε_{libre} (par exemple $\psi_{th} \alpha_{béton} \Delta T = 0,5 \times 10^{-5} \times \Delta T$).

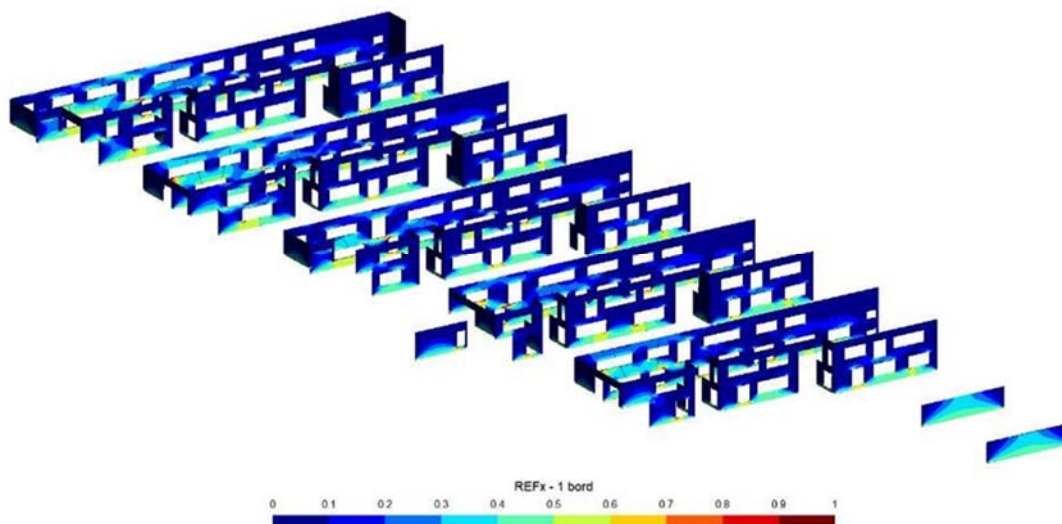
On évalue le champ des contraintes horizontales σ_{xx} et σ_{yy} verticales du calcul éléments finis élastique et, en conformité avec l'Eurocode 2 partie 3, on évalue le coefficient de bridage local $R_{ax,EF}$ par la relation suivante :

$$R_{ax,EF} \text{ (ou } y) = \sigma_{xx} \text{ (ou } \sigma_{yy}) / (E_{cm} \cdot \varepsilon_{libre})$$

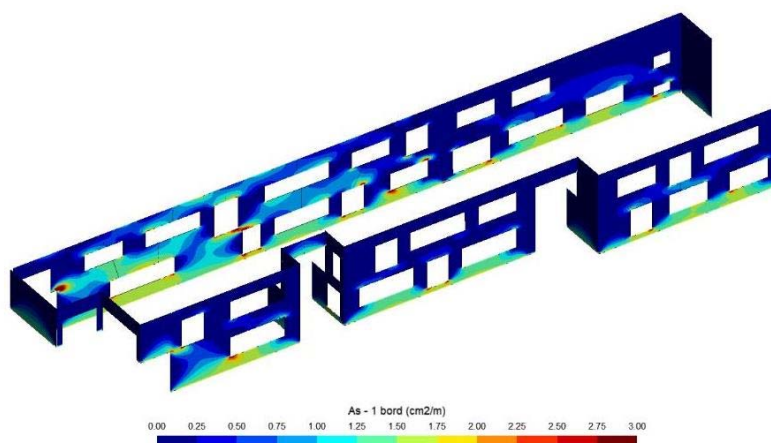
Dans cette analyse, on considère le module effectif $E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{n}$, E_{cm} est le module élastique instantané du béton, n le coefficient permettant de prendre en compte les phénomènes non linéaires de relaxation des contraintes (fluage, microfissuration...); n est égal à 2 en cohérence avec les éléments de l'Eurocode 2 partie 3.

On obtient alors une cartographie des coefficients de bridage telle que celle illustrée sur la figure suivante sur un ensemble de voiles.

Figure 14 – Cartographie des coefficients de bridage Eurocode par éléments finis



Sur la base du coefficient de bridage déterminé en chaque point, on peut alors évaluer directement la section d'acier mini nécessaire en chaque point pour limiter l'ouverture éventuelle de fissures, à partir de la relation présentée plus haut.

Figure 15 – Cartographie des besoins en acier mini

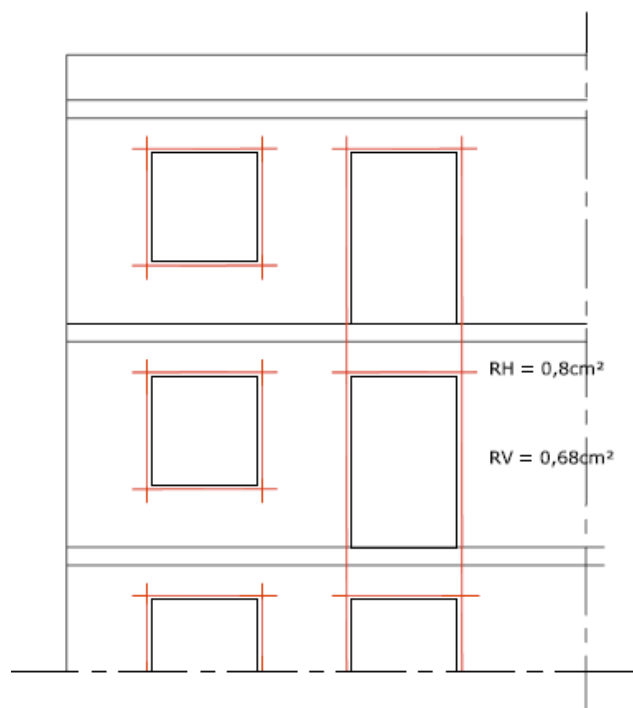
On rappelle ici que lors de cette analyse finale, le ST25C ($2,57 \text{ cm}^2/\text{m}$) et les aciers ajoutés autour des ouvertures ($0,8 \text{ cm}^2$ en horizontal autour des ouvertures et aciers en diagonale), sont pris en compte dans A_S .

Pour le contrôle de l'ouverture des fissures, il n'est pas nécessaire de placer plus d'aciers que les sections de non-fragilité présentées dans le Tableau 7 - Ferrailage de non-fragilité en fonction de l'épaisseur de paroi et de la résistance à la compression du béton.

Annexe XII : Traitement des ouvertures dans les voiles

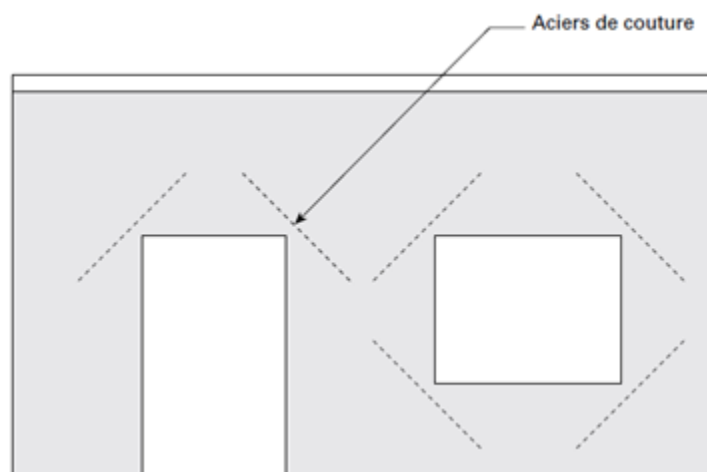
Section 9.6.2 et 9.6.3 Note 1 de l'Annexe Nationale de NF EN 1992-1-1/NA

- Les angles des ouvertures pratiquées dans tout voile (telles que des fenêtres ou portes, etc.) doivent être bordés par des aciers verticaux (RV) d'au moins $0,68 \text{ cm}^2$ sur au moins $0,40 \text{ m}$ et convenablement ancrés
- Pour les bâtiments et pour tout voile d'au plus 25 cm d'épaisseur, les ouvertures pratiquées dans tout voile (telles que des fenêtres ou portes, etc.) doivent être bordées par des aciers horizontaux (RH) d'au moins $0,8 \text{ cm}^2$ et convenablement ancrés



**Renfort autour des ouvertures selon
NF EN 1992-1-1**

Pour se prémunir contre l'apparition de fissures à 45° aux angles des ouvertures, il est recommandé de disposer des armatures complémentaires perpendiculaires à la bissectrice des angles d'ouvertures :



Annexe XIII : Exemple d'hypothèses et de méthode de modélisation

NOTE : Cette annexe a pour but de montrer les hypothèses et la méthode de modélisation d'une structure GBE à travers un exemple. Les valeurs numériques employées sont propres à cet exemple et doivent être adaptées au cas par cas.

1. Hypothèses générales

1.1. Caractéristiques des matériaux

Paroi extérieure - Béton

Propriétés mécaniques et thermiques	Symbole	Valeur	Unités
Résistance caractéristique en compression	f_{ck}	35	MPa
Résistance moyenne en traction	f_{ctm}	3,2	MPa
Module d'Young Instantané	E_{cm}	34 000	MPa
Différé	E_{bd}	11 300	MPa
Section fissurée	E_{bf}	17 000	MPa
Coefficient de Poisson	ν_b	0	-
Masse volumique	ρ_b	2 500	kg/m ³
Coefficient de dilatation	α_b	10 ⁻⁵	-

Tableau 11 - Propriétés du béton.

Isolant

Matériau	polystyrène expansé, en polystyrène extrudé ou en polyuréthane
Géométrie	plaques rigides d'épaisseur = 12 et 8 cm
Module d'Young	4 MPa
Masse volumique	30 kg/m ³

Tirants métalliques - Acier

Propriétés mécaniques	Symbole	Valeur	Unités
Module d'Young	E_s	200 000	MPa
Coefficient de Poisson	ν_a	0,3	-
Masse volumique	ρ_a	7 850	kg/m ³
Limite d'élasticité	σ_y	500	MPa
Module post-élastique	E_{aT}	0	MPa

Tableau 12 - Propriétés mécaniques de l'acier des tirants.

1.2. Charges

Charges permanentes

Poids propre des éléments de structure et surcharge permanente

Le poids propre est déterminé à partir des masses volumiques des éléments de structure.

Les plaques d'isolant sont représentées par des masses surfaciques équivalentes de 1,35 kg/m² sur la face extérieure des parois intérieures et la face intérieure des parois extérieures.

Les surcharges liées au revêtement de la toiture (200 kg/ml) et à la charpente en bois (230 kg/ml) sont appliquées sur les voiles en périphérie de la toiture.

Charges d'exploitation

D'après l'EN-1991-1-1/NA, la charge d'exploitation appliquée sur les planchers (de catégorie A) est égale à 1,5 kN/m² et la surcharge dans le cas des balcons est Q=3,5 kN/m². Ces surcharges sont appliquées d'une manière uniforme sur les éléments concernés.

Charges accidentelles

Séisme

Le spectre pris en compte pour le calcul sismique correspond aux paramètres suivants, tels que définis dans ma NF EN 1998-1.

- Séisme en zone 5
- Catégorie d'importance IV
- Classe de sol D

Accélération de référence	a_r	3 m/s ²
Coefficient d'importance	γ	1,4
Accélération horizontale de calcul	a_g	4.2 m/s ²
Paramètre de sol	S	1,35
Coefficient de comportement	q	1
	TB	0,2
	TC	0,8
	TD	2

Tableau 13 - Caractéristiques de l'acier et les coefficients partiels pour le calcul des épingles en compression.

Suivant l'arrêté du 22 octobre 2010 dans sa version modificative du 15 septembre 2014, avec ces paramètres nous pouvons construire le spectre suivant :

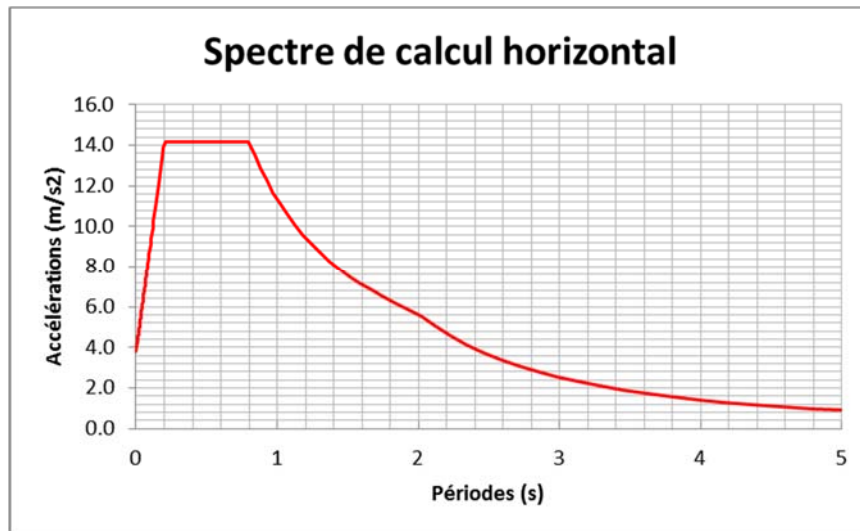


Figure 16 – Spectre de calcul sismique

1.3. Combinaison de charges

Les combinaisons de cas de charges sont conformes aux préconisations de l'Eurocode 0. En accompagnement du séisme, 50% de la charge d'exploitation est supposée présente de manière concomitante.

L'enveloppe des résultats est prise en compte pour les vérifications.

2. Démarche générale de l'étude

Le but est d'étudier le comportement des panneaux extérieurs des doubles murs GBE en se basant sur les préconisations de l'avis technique.

Le déroulement de l'étude suit les étapes suivantes :

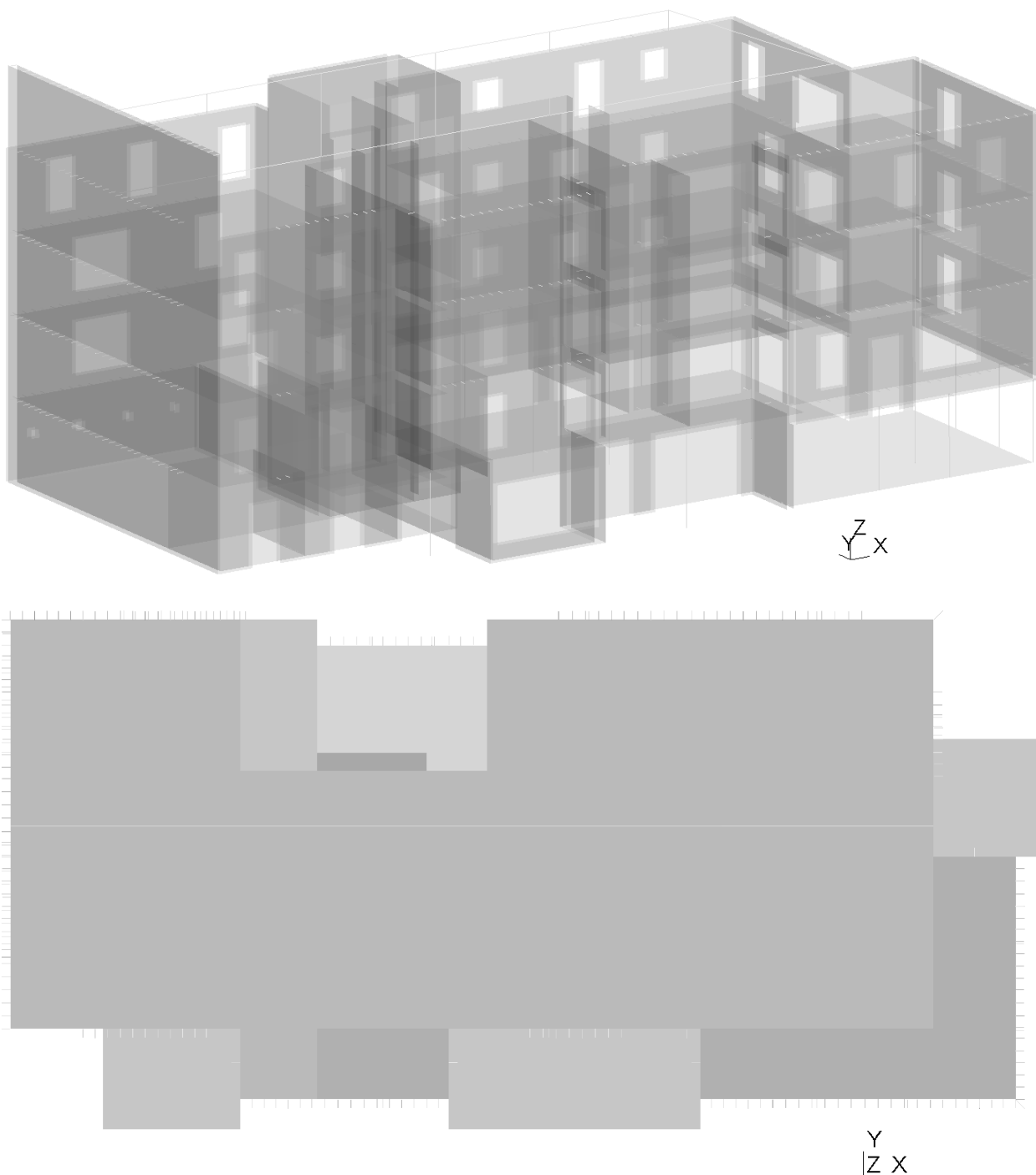
- Modélisation du bâtiment par un modèle élément fini intégrant le procédé GBE
- Application des recommandations du dossier technique pour la mise en place d'un ferrailage pratique minimal dans l'ensemble des configurations rencontrées
- Évaluation du comportement et de la résistance des façades vis-à-vis des sollicitations en plan et hors plan sous action sismique, en tenant compte de l'interaction entre les façades et le bâtiment.
- Evaluation de la résistance en traction des barres de liaisons sous charges hors plan sous action sismique

3. Description du modèle EF

3.1. Système d'axes

Le système d'axes retenu est présenté ci-dessous.

Figure 17 – Système d'axes du modèle EF



3.2. Principes de modélisation

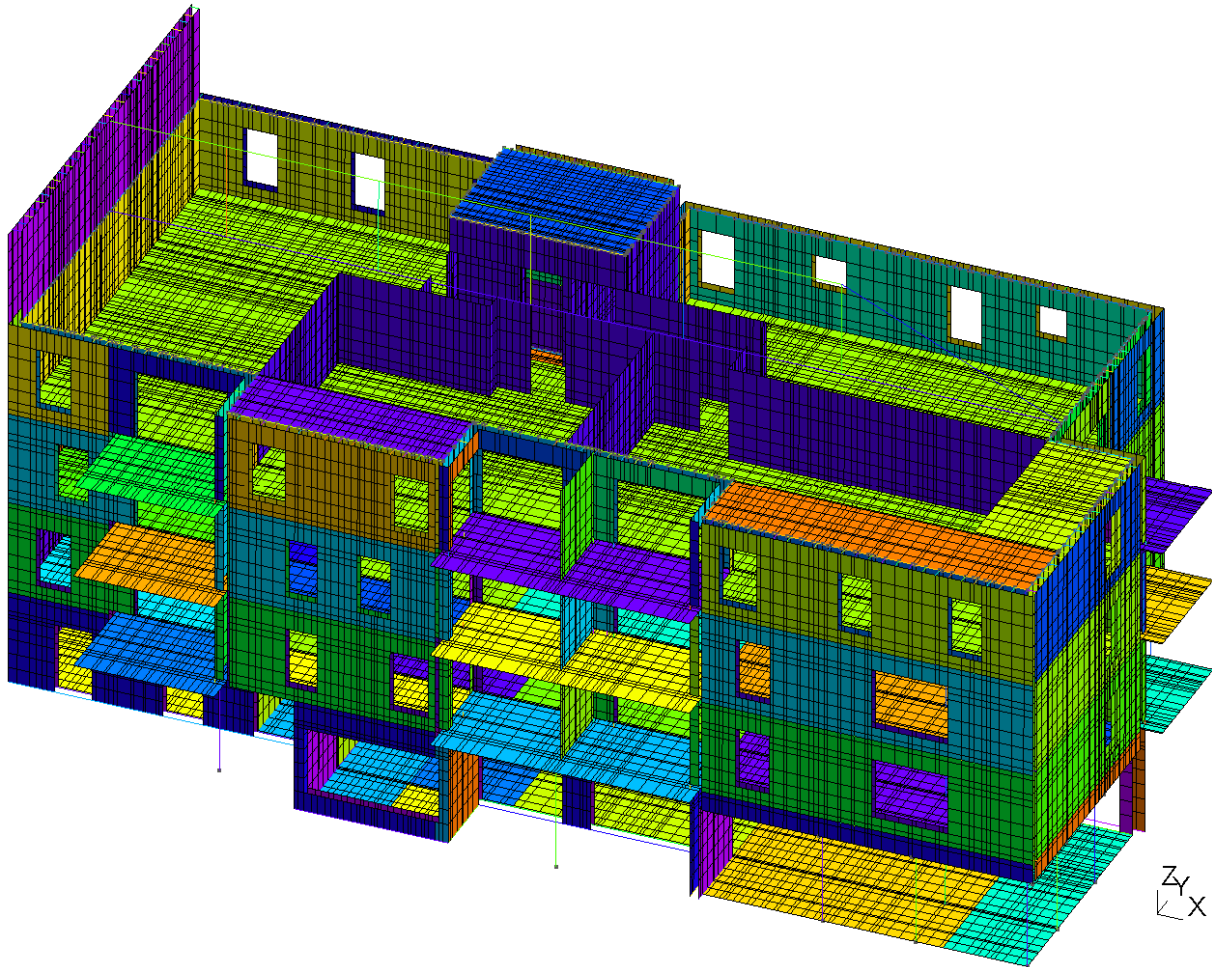
La structure fait l'objet d'un modèle numérique 3D aux éléments finis. Le modèle et les calculs sont réalisés à l'aide du logiciel Code Aster.

Tous les éléments du modèle sont placés au droit de leur feuillet moyen. Le maillage est réalisé avec un pas de discrétisation moyen de 50 cm en utilisant des éléments 2D quadrangulaires à 4 nœuds.

Les voiles et les planchers sont modélisés par des éléments coques DKT.

La modélisation de la structure interne du bâtiment sert à estimer les efforts que subissent les panneaux extérieurs des façades, dont le comportement fait l'objet de cette étude.

Figure 18 – Zone de contribution d'un linteau



Charpente en bois

La toiture est formée d'une charpente en bois et d'une tuilerie. Elle est modélisée par des masses linéiques appliquées sur les voiles périphériques. La partie centrale de la charpente est modélisée par des poutres afin de représenter au mieux le comportement de la partie supérieure de la façade ouest du bâtiment notamment sous sollicitations sismiques.

Le modèle de la charpente est constitué de poutres et de barres articulés. L'ensemble est fixé aux voiles porteurs des façades.

Double mur

La paroi intérieure des panneaux est modélisée par des éléments coques de 16 cm d'épaisseur et la paroi extérieure est modélisée par des éléments coques de 10 cm d'épaisseur. La distance entre les fibres moyennes des deux coques est de 26 cm.

Les plaques d'isolant ne sont pas modélisées. Elles sont représentées par des masses surfaciques équivalentes sur la face extérieure des parois intérieures et la face intérieure des parois extérieures.

Les épingles de 6 mm de diamètre sont modélisées par des éléments discrets ou des ressorts de rigidités équivalentes à celles des épingles. Les raideurs transversales et en rotation sont basées sur un modèle de poutre console d'inertie équivalente à l'épingle, et de longueur égale à la demi-longueur libre. La raideur axiale est déduite de la section de l'épingle.

- Rigidité en traction

$$K_t = \frac{ES}{L} = 21\,700 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

- Rigidité transversale :

$$K_f = \frac{3EI}{L^3} = 17.37 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

- Rigidité en rotation :

$$K_r = \frac{2EI}{L^2} = 1,5 \text{ kN}$$

avec :

- E le module de Young de l'acier égal à 200 000 MPa

- S la section de l'épingle égale à 28.26 mm²
- I l'inertie de l'épingle *égale* à $6,36 \times 10^{-11}$ m⁴
- L la longueur de l'épingle égale à 26 cm
- $L' = \frac{L}{2}$

Les épingles sont conçues pour résister aux efforts de traction sur la paroi externe. Elles sont dimensionnées afin d'être insensibles à d'autres chargements, notamment les mouvements d'origine thermiques. Afin de limiter ces sollicitations, les épingles doivent être le plus souple possible vis-à-vis des mouvements transversaux. Or, la contrainte dans l'épingle est proportionnelle au rayon de sa section et inversement proportionnelle au carré de sa longueur libre donnée par :

$$L_{elas} = \sqrt{\frac{3 E d u}{\sigma_y}}$$

Avec :

- E le module de Young de l'acier
- d le diamètre de l'épingle
- u le déplacement de la paroi externe par rapport à la paroi interne sous sollicitations thermiques
- σ_y la limite élastique de l'acier

D'après le calcul, la longueur libre nécessaire pour qu'une épingle de 6 mm reste dans le domaine élastique est égale à 26 cm, ce qui est pris en compte dans le modèle.

Balcons

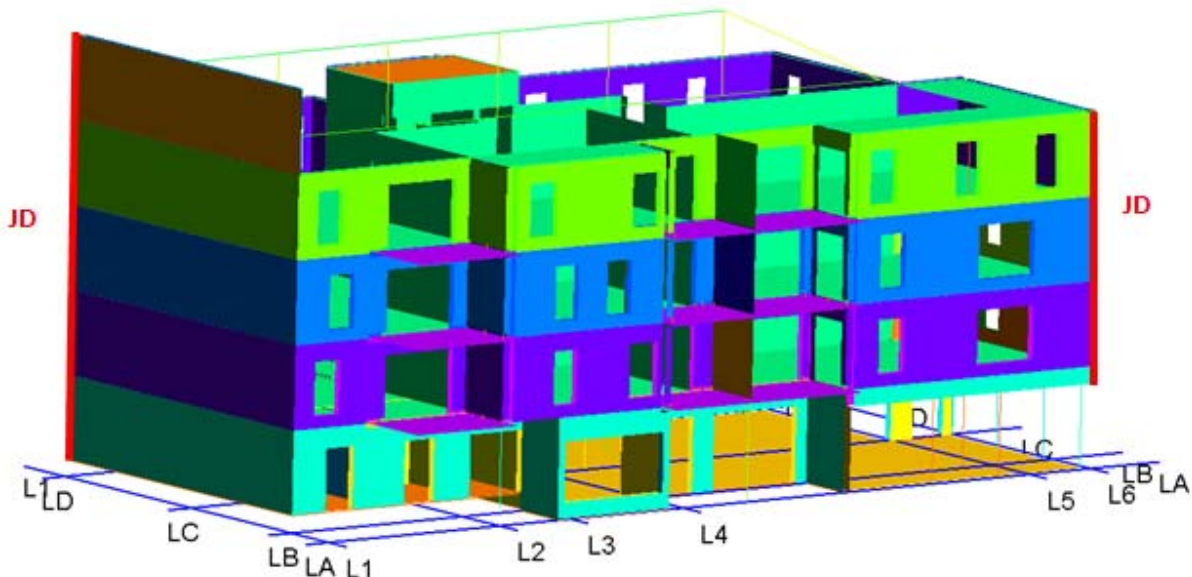
A l'interface avec les balcons, les coques des parois extérieures sont arrêtées sans liaison avec la dalle de balcon, au-dessus et sous les coques des balcons (à une distance représentant approximativement la demi-épaisseur de la dalle du balcon + joint). Des épingles sont disposées à leur base pour limiter leur déplacement hors plan. De plus, ils reposent sur la dalle des balcons à travers des éléments à déplacement bloqué.

Des joints sont créés aux coins des balcons dans les panneaux extérieurs.

Joints

Afin de limiter les effets de « bague » contrainte thermiquement, de la peau extérieure, qui génère une grande quantité d'efforts sous cas de charges thermiques, des joints sont réalisés à deux coins opposés du bâtiment, permettant de relâcher les contraintes en libérant les déplacements.

Figure 19 – Modèle éléments finis. Localisation des joints



Connexion au niveau des poteaux

Les éléments poteaux au rez-de-chaussée sont connectés à la paroi extérieure de l'étage en dessus par des éléments rigides. Les poteaux sont alignés avec les murs porteurs. La paroi extérieure est liée rigidement au mur porteur au niveau de la dalle.

Conditions aux limites

Les interactions sol-structure ne sont pas prises en compte. Les poteaux et voiles sont considérés encastres dans le sol, y compris la peau extérieure lorsqu'elle descend jusqu'au niveau des fondations.

3.3. Maillage

Le tableau suivant récapitule le nombre et le type de mailles et de nœuds qui constituent le modèle :

Type d'éléments	Nombre
Mailles ponctuelles (POI 1)	658
Mailles linéiques (SEG 2)	3 090
Mailles surfaciques quadrangulaires (QUAD 4)	85 945
Nœuds	99 160

Tableau 14

4. Dimensionnement de la paroi extérieure

La démarche de dimensionnement du ferrailage de la peau extérieure consiste à :

1. Saisir le ferrailage minimal selon les indications du dossier technique ;
2. Calculer le besoin en ferrailage à partir des sollicitations mécaniques (hors cas de chargement thermique) ;

Le besoin en ferrailage se fait sur la base des méthodes de calcul données dans l'Eurocode 2, à l'aide des coefficients partiels de sécurité suivants :

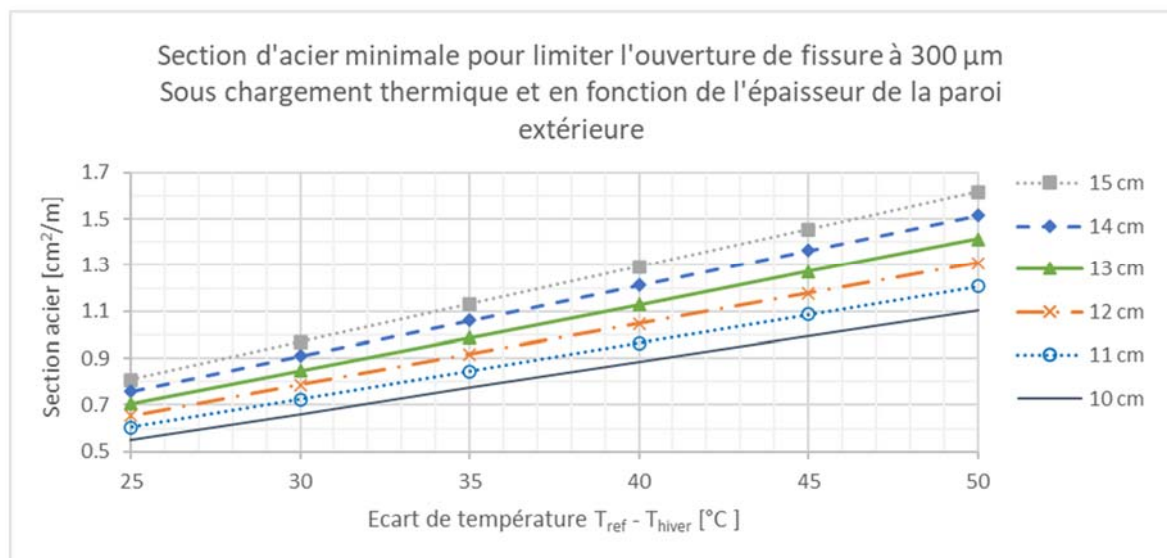
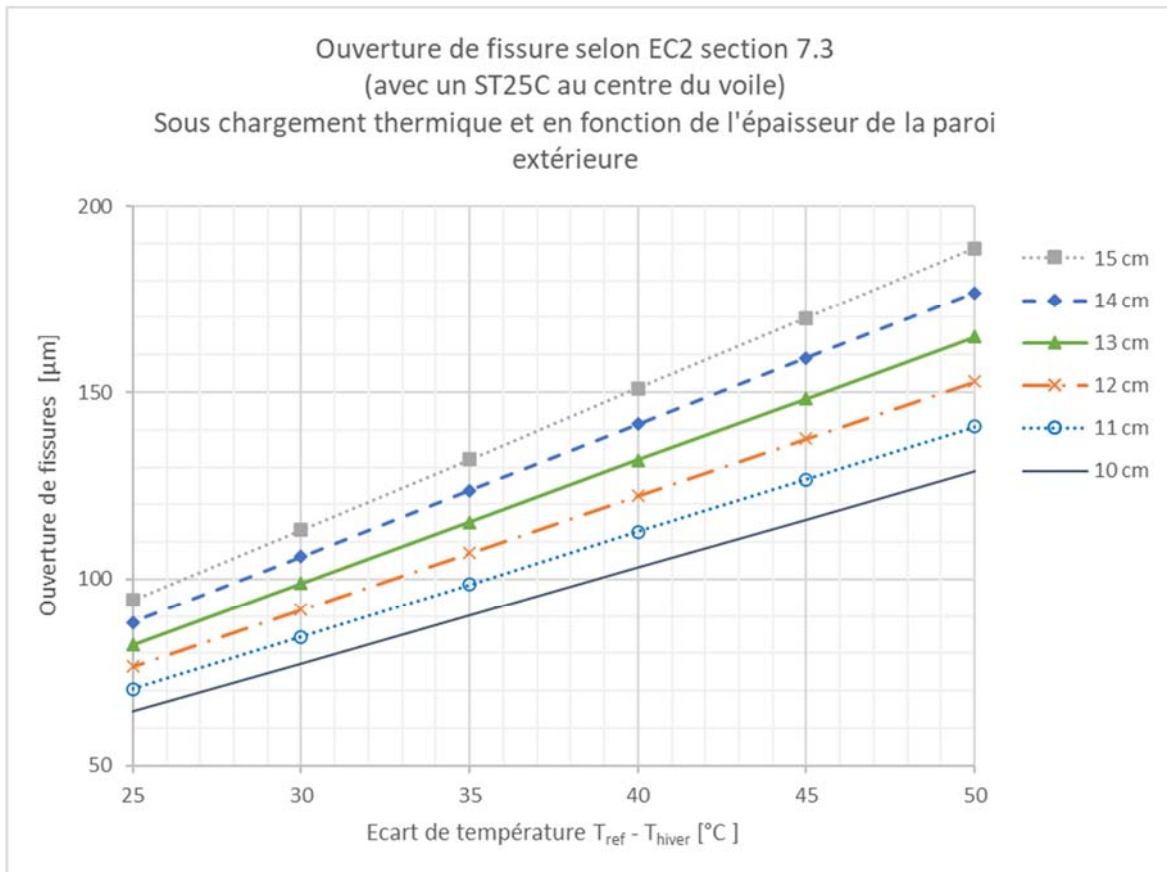
Situation	γ_c (béton)	γ_s (aciers d'armature)
Fondamentale (durable et transitoire)	1,50	1,15
Sismique	1,30	1,00

Tableau 15.

3. Comparer ces deux quantités pour aboutir au ferrailage enveloppe final à mettre en œuvre.

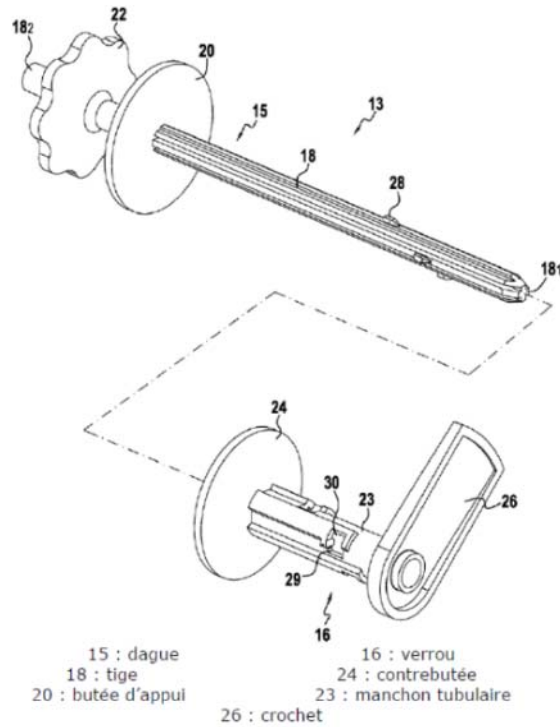
Annexe XIV : Valeur indicative de l'ouverture des fissures maximale sous chargement thermique

Valeurs obtenues pour un coefficient de bridage de 0,5 (pour rappel un coefficient de bridage de 0,5 est la valeur maximale en zone courante, observée dans les zones totalement bridées) dans un voile plein. Ouverture des fissures avec un ST25C (2,57cm²/m dans les deux directions) pour un chargement thermique donné, ou Section requise pour une ouverture de fissure maxi de 300 µm pour un chargement thermique donné.



Annexe XV : Système de positionnement et d'assemblage

Figure 20 – Système de positionnement des panneaux isolants – dague/verrou



Exemple dague pour mur de 40 cm
(10 ext. – 10 iso. – 20 int.)

Exemple dague pour mur de 68 cm
(13 ext. – 31 iso. – 24 int.)

Figure 21 – Système d'assemblage des banches - entretoises

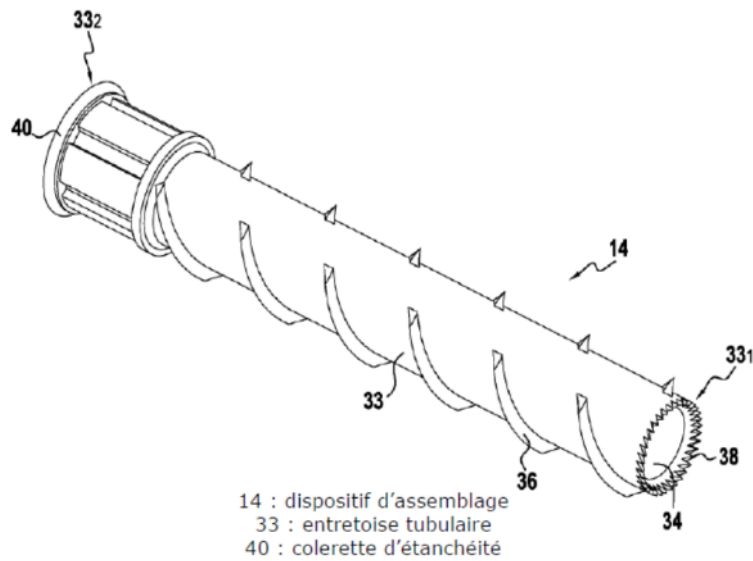


Figure 22 – Ensemble du système de positionnement et assemblage

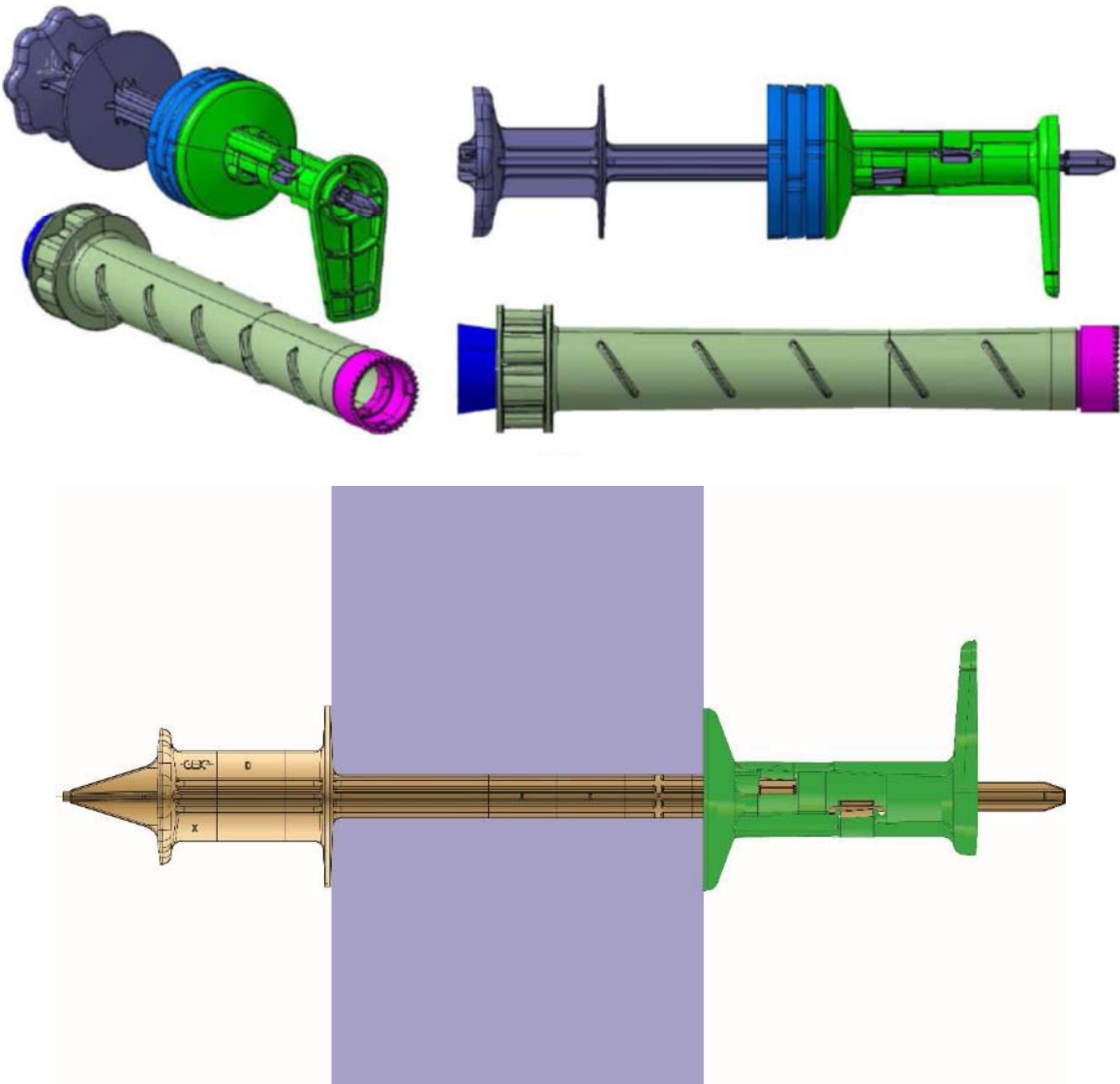
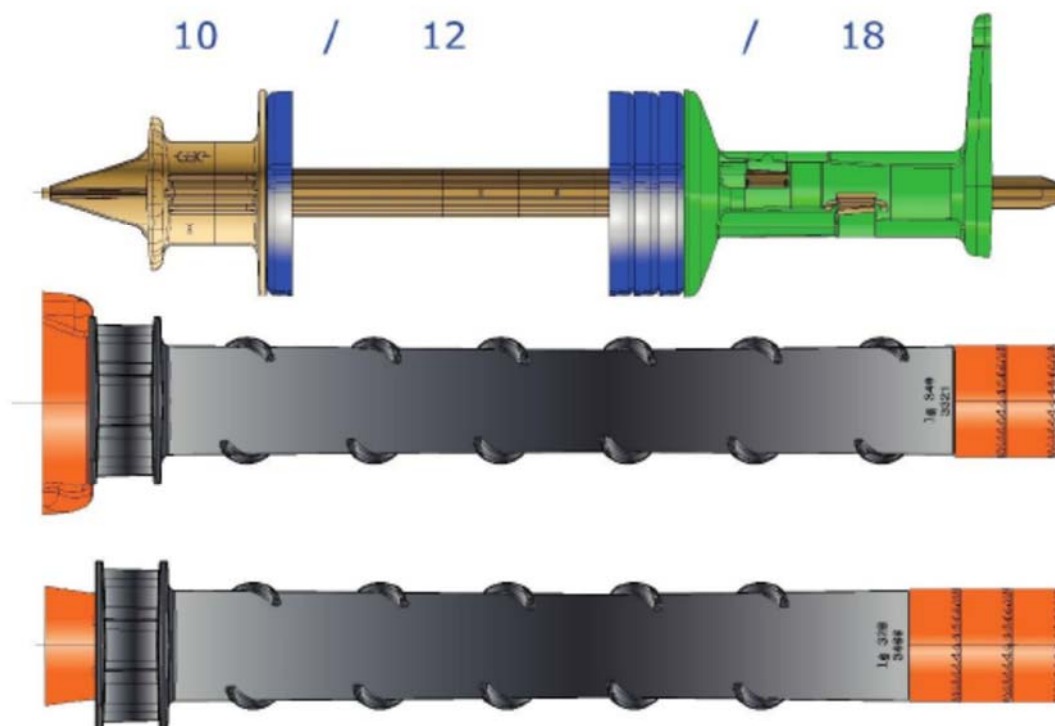


Figure 23 – Exemple de pièces pour un mur de 40 cm d'épaisseur : 10 cm de peau extérieure, 12 cm d'isolant, 18 cm de paroi intérieure



Les pièces plastiques sont fabriquées pour chaque projet suivant les épaisseurs voulues, par pas de 1 cm, avec les possibilités suivantes :

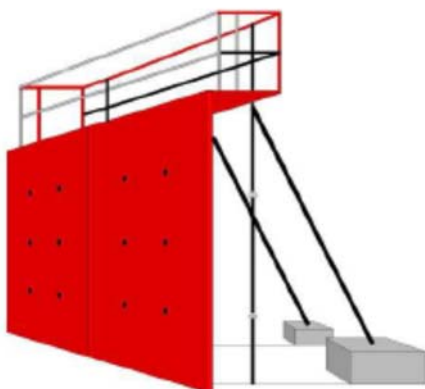
Epaisseur de la peau extérieure	Epaisseur de l'isolant	Epaisseur de la paroi intérieure
Supérieure à 10 cm	5 à 34 cm	A partir de 14 cm

Avec une épaisseur totale d'au minimum 29 cm

Soit plusieurs milliers de possibilités

Annexe XVI : Méthode constructive

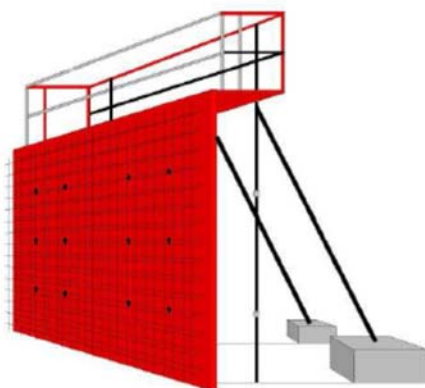
- La réalisation préalable d'une talonnette permet de bien coffrer le pied des murs et de se prémunir des éventuelles fuites de béton dues à un défaut d'étanchéité des coffrages.
- Vérification par le chef d'équipe ou chef de chantier de l'implantation du mur et des armatures en attente (cf. PAQ).

2.

- Mise place des coffrages intérieurs.
- Stabilisation du coffrage selon les préconisations du fabricant.

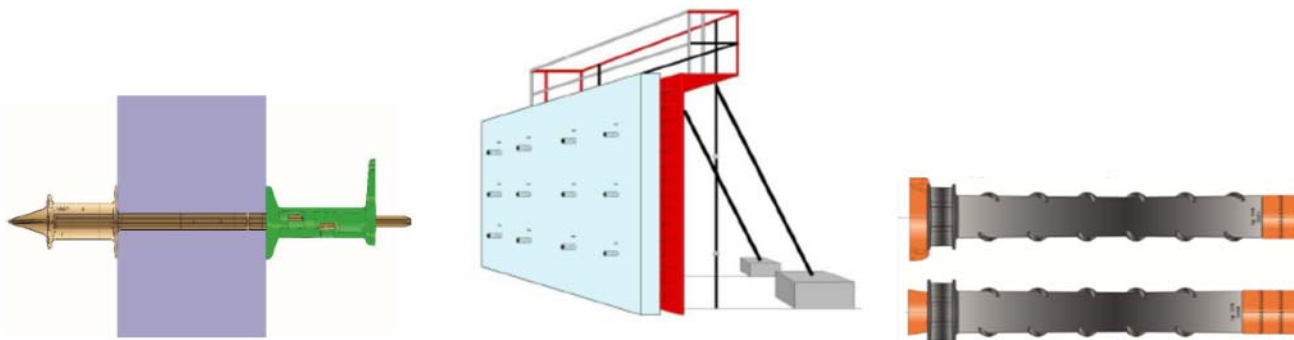
3.

Installation, réglage et fixation des mannequins, précadres et réservations.

4.

- Mise en place des armatures de la paroi intérieure porteuse.
- Incorporation des gaines électriques, des réseaux et réservations diverses pour les corps d'état secondaires.
- Contrôle du ferrailage par le chef d'équipe ou le chef de chantier (cf. PAQ)

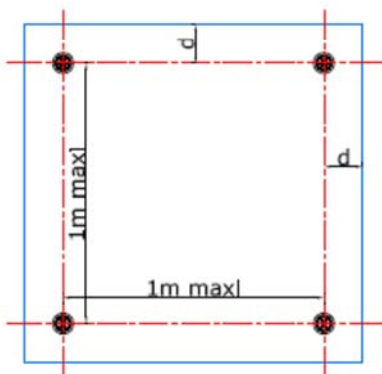
5.



- Mise en place de l'isolant équipé des systèmes de placement et accrochage provisoire au ferrailage intérieur. Il convient de repérer au préalable les emplacements des dagues sur les panneaux d'isolant. La répartition des dagues-verrous se fait avec un minimum de 4 par panneau d'isolant, au voisinage des angles, avec une distance de 10 à 25 cm des bords de panneaux, et en assurant une distance maxi de 1 m entre chaque dague (chaque dague est à 1 m maximum de deux autres dagues). Les dagues sont enfoncées au travers de l'isolant. Un avant trou est réalisé si nécessaire. Insérer la dague correspondant aux caractéristiques du double mur réalisé dans l'isolant et positionner le verrou intérieur. Faire pivoter le verrou d'un quart de tour pour bloquer l'ensemble de façon à empêcher la désolidarisation des dagues et des verrous.

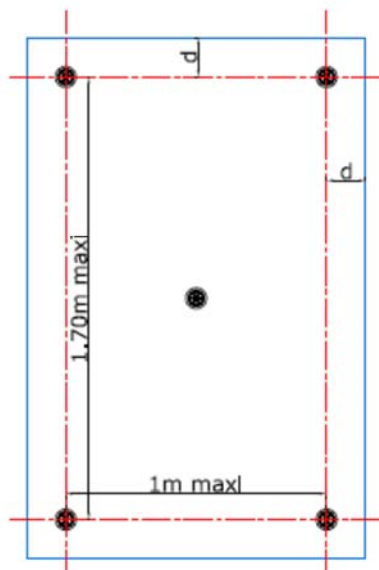
Règles de positionnement des dagues par panneau d'isolant

d= 10 à 25cm



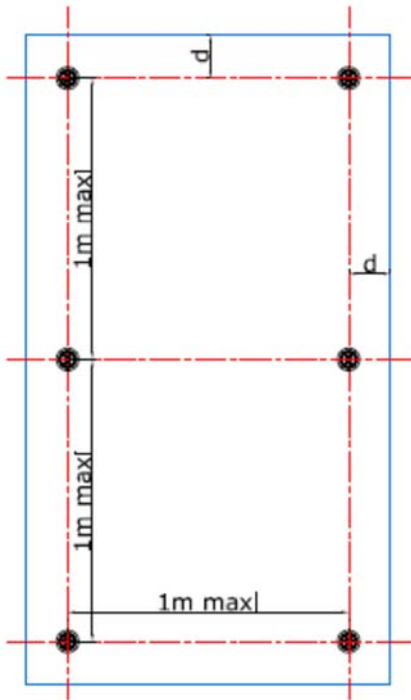
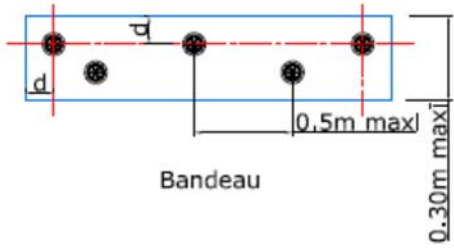
Panneau d'Isolant de dimension maxi 1,30m X 1,30m

4 dagues par panneau



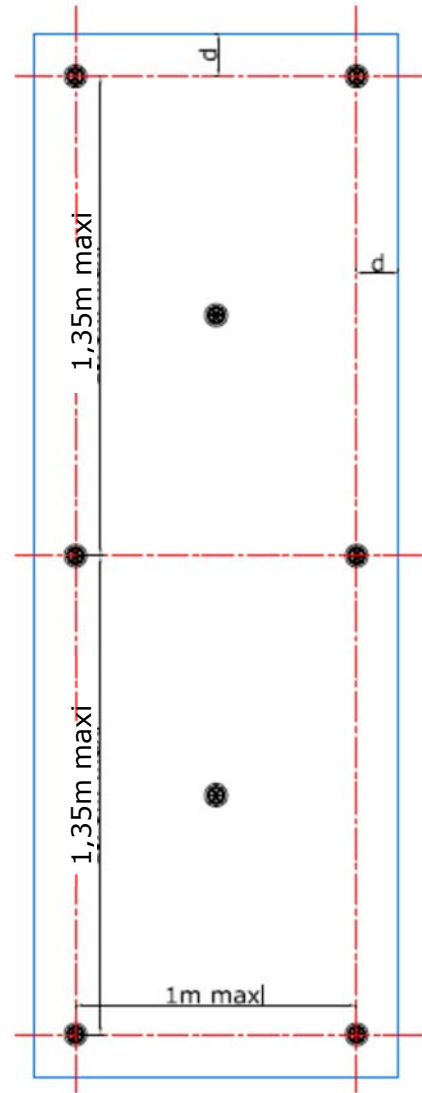
Panneau d'Isolant de dimension maxi 1,30m X 2,00m

5 dagues par panneau



Panneau d'isolant de dimension
maxi 1.30m X 2.30m

6 dagues par panneau



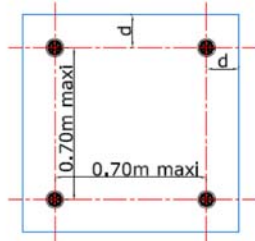
Panneau d'isolant de dimension
maxi 1.30m x 3.00m

8 dagues par panneau

Pour les murs où il est prévu des coulages de béton sur une grande hauteur, il convient de densifier la répartition des dagues-verrous en partie basse en assurant que chaque dague soit positionnée à moins de 1m de 3 autres dagues, soit la répartition suivante :

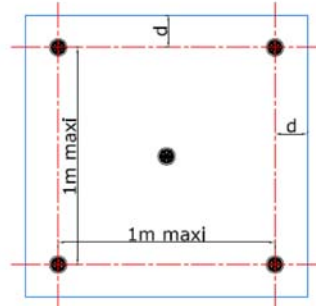
Règles de positionnement des dagues en partie basse dans le cas de grandes hauteurs de

4 dagues par panneau



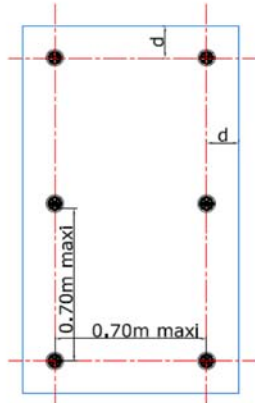
Panneau d'isolant de dimension
maxi 1.00m X 1.00m

5 dagues par panneau



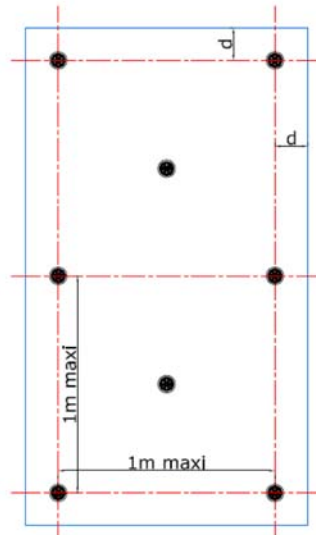
Panneau d'isolant de dimension
maxi 1.30m X 1.30m

6 dagues par panneau



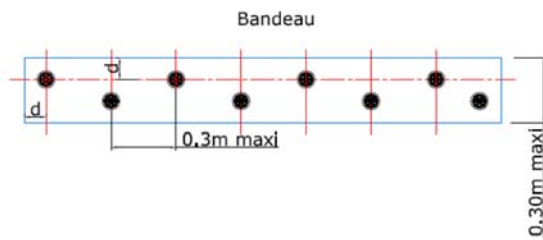
Panneau d'isolant de dimension
maxi 1.00m X 1.70m

8 dagues par panneau



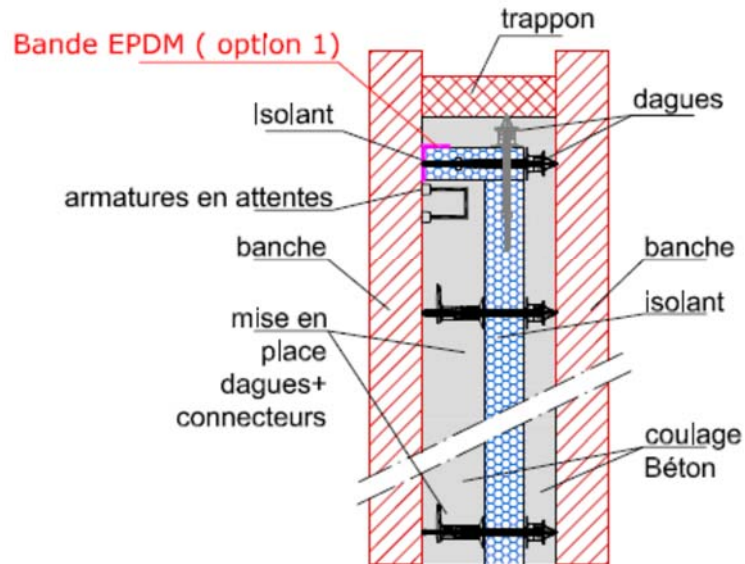
Panneau d'isolant de dimension
maxi 1.30m X 2,30m

d = 10 à 20cm

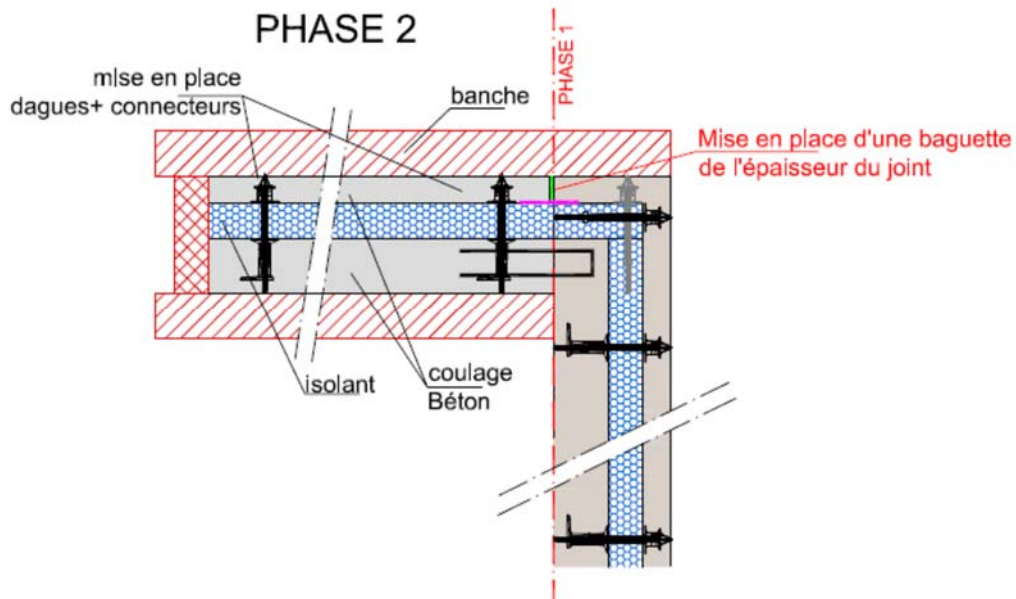


Détail de réalisation pour un angle sortant

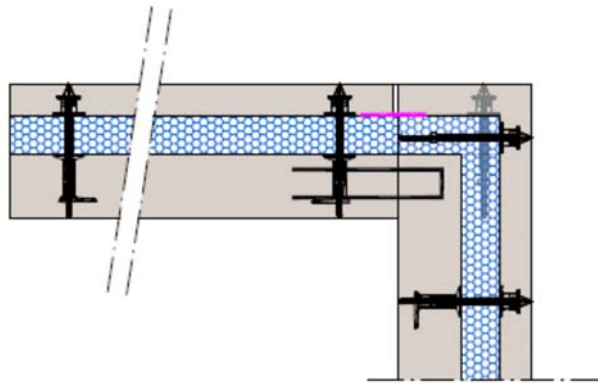
PHASE 1



PHASE 2

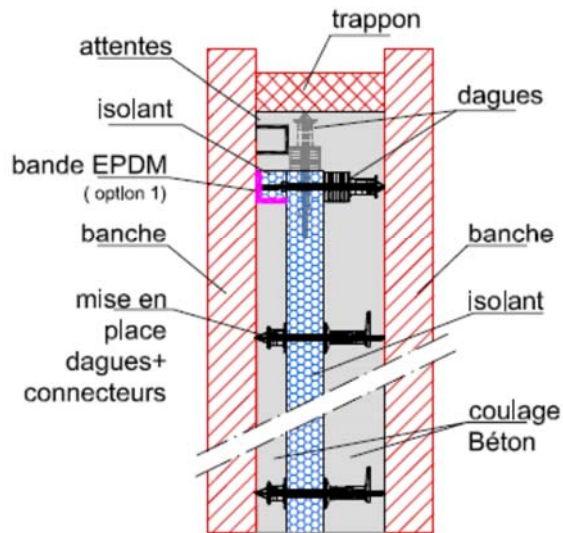


PHASE 3

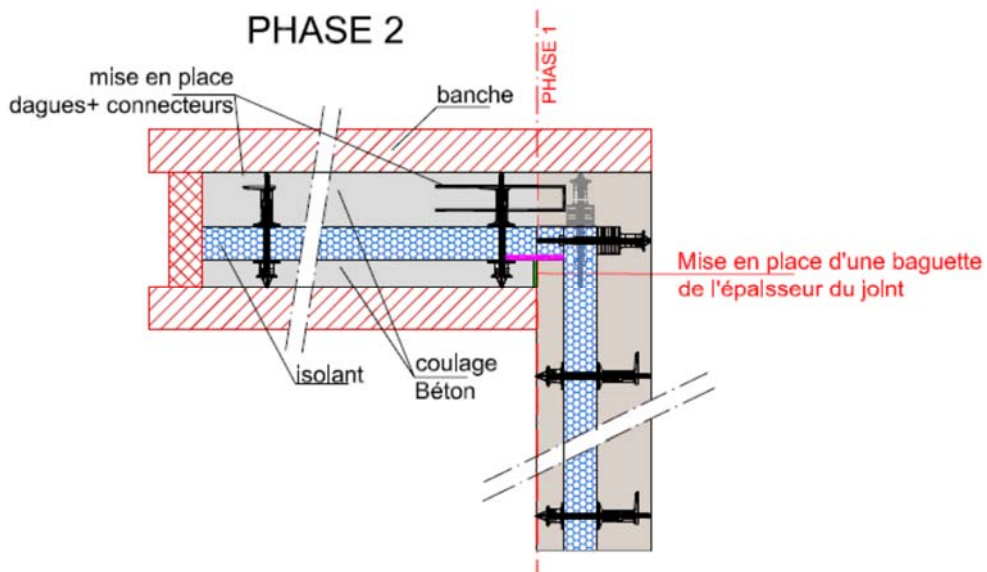


Angle rentrant

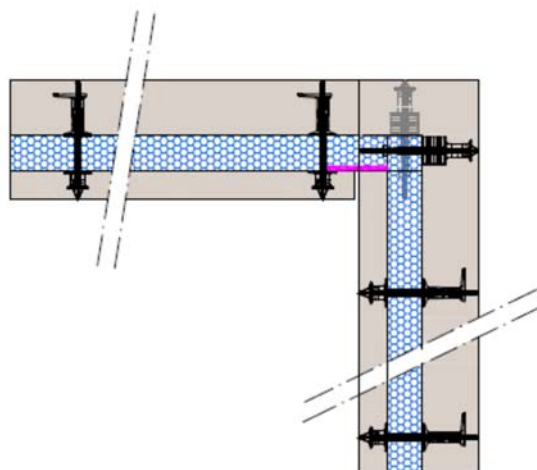
PHASE 1



PHASE 2

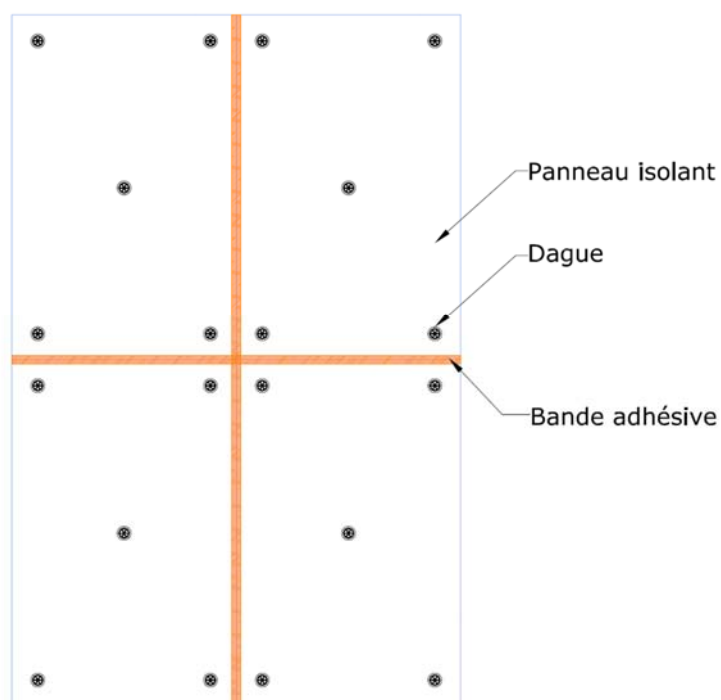


PHASE 3



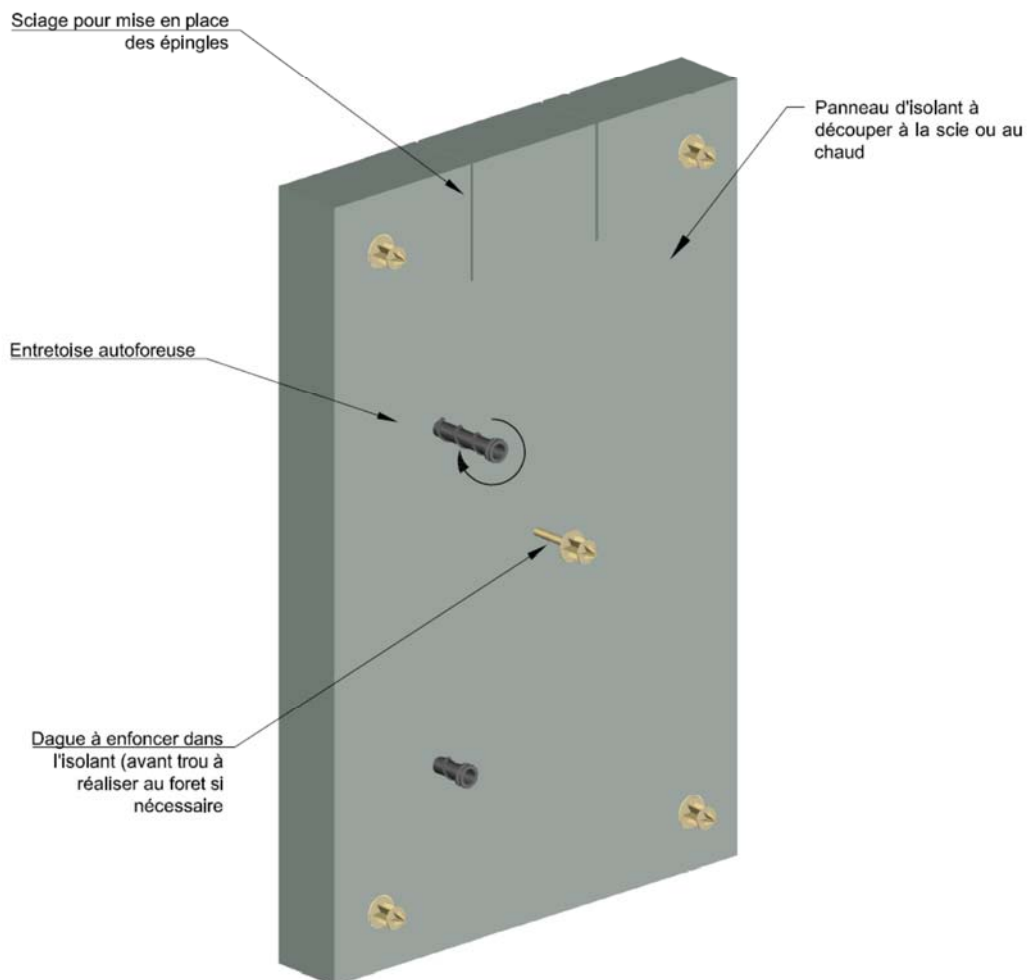
- Les panneaux d'isolant équipés des connecteurs plastiques sont posés à bords jointifs et les joints entre panneaux sont recouverts du côté du voile extérieur par une bande adhésive. Les connecteurs sont en butée contre la banche intérieure. Ils peuvent être tournés grâce à la molette extérieure de façon à permettre le maintien en phase provisoire de l'isolant.

Traitement des joints horizontaux et verticaux
--



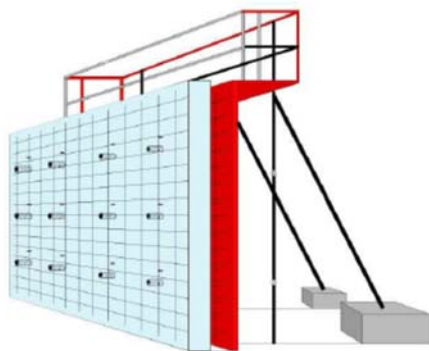
- Les panneaux sont découpés à la scie ou au fil chaud
- L'isolant est scié à partir de son bord supérieur pour permettre la mise en place des épingles

Mode de découpe et de percement des panneaux d'isolants



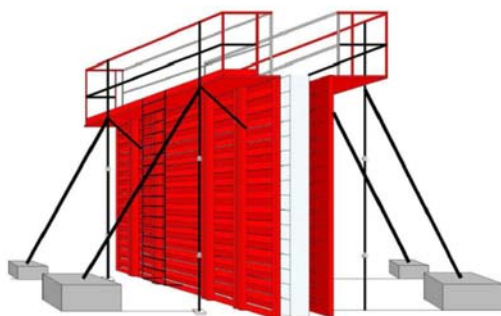
- Mise en place des entretoises spécifiques. Un adaptateur est utilisé pour la mise en place des entretoises avec un outil électroportatif. Les entretoises munies d'embouts amovibles sont autoforeuses. Elles sont insérées au droit des trous de serrage, à repérer au fur et à mesure de l'avancement, jusqu'à être en butée contre la banche intérieure.
- En cas démarrage en pied de façade, mise en place d'une équerre d'étanchéité dans l'épaisseur de l'isolant avec un relevé sur la face côté intérieur de l'isolant.

6.



- Mise en place du ferrailage de la peau extérieure.
- Mise en place des épingles en acier inoxydable suivant les plans du bureau d'études (diamètre, implantation, longueur libre).
- Contrôle par le chef d'équipe ou chef de chantier des épingles de liaison entre les deux parois du mur, des armatures de la peau extérieure et des armatures en attente pour le mur suivant (cf PAQ).

7.



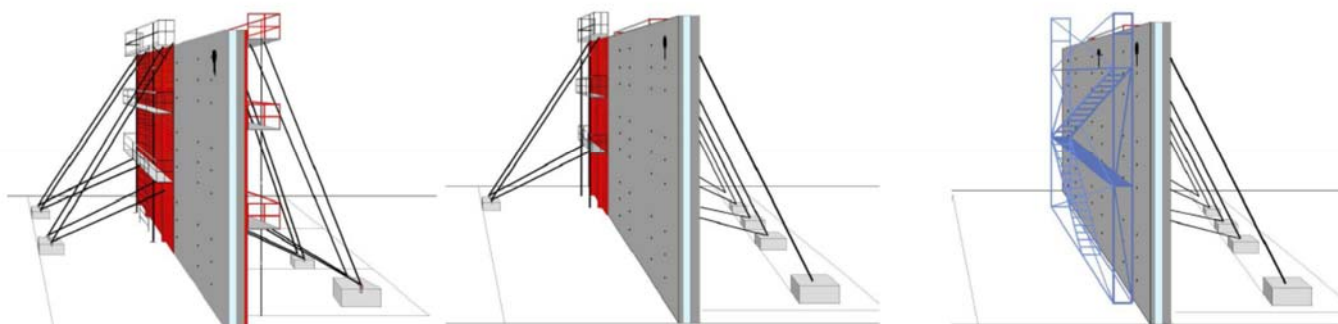
- Mise en place du second coffrage, extérieur.
- Stabilisation du coffrage selon les préconisations du fabricant.
- Mise en place des tiges de serrage en traversant les entretoises spécifiques au procédé et serrage.

8.



Coulage en simultané des deux parois du mur, de part et d'autre de l'isolant avec un béton autoplaçant tel que l'Ultra Twin Procédé GBE® de Lafarge France ou équivalent. Le coulage nécessite un contrôle de la vitesse de bétonnage des deux parois qui doit être identique des deux côtés (différence de hauteur de béton toujours inférieure à 50 cm entre les parois tout au long du coulage) afin d'éviter tout phénomène de cisaillement de l'isolant et de conserver son positionnement dans le coffrage.

9.



- Décoffrage de la peau extérieure et de la paroi intérieure en s'assurant d'enlever les éléments de fixations des mannequins sur le coffrage intérieur (aimants ...). Le décoffrage commence par l'élément extérieur. Etalement du mur si nécessaire.

Annexe XVII : Schémas et détails type du procédé GBE

- **Exemple de répartition des connecteurs plastiques, des entretoises et des épingles**

Figure 24 – Exemple de répartition des connecteurs plastiques, des entretoises et des épingles. Vue en coupe

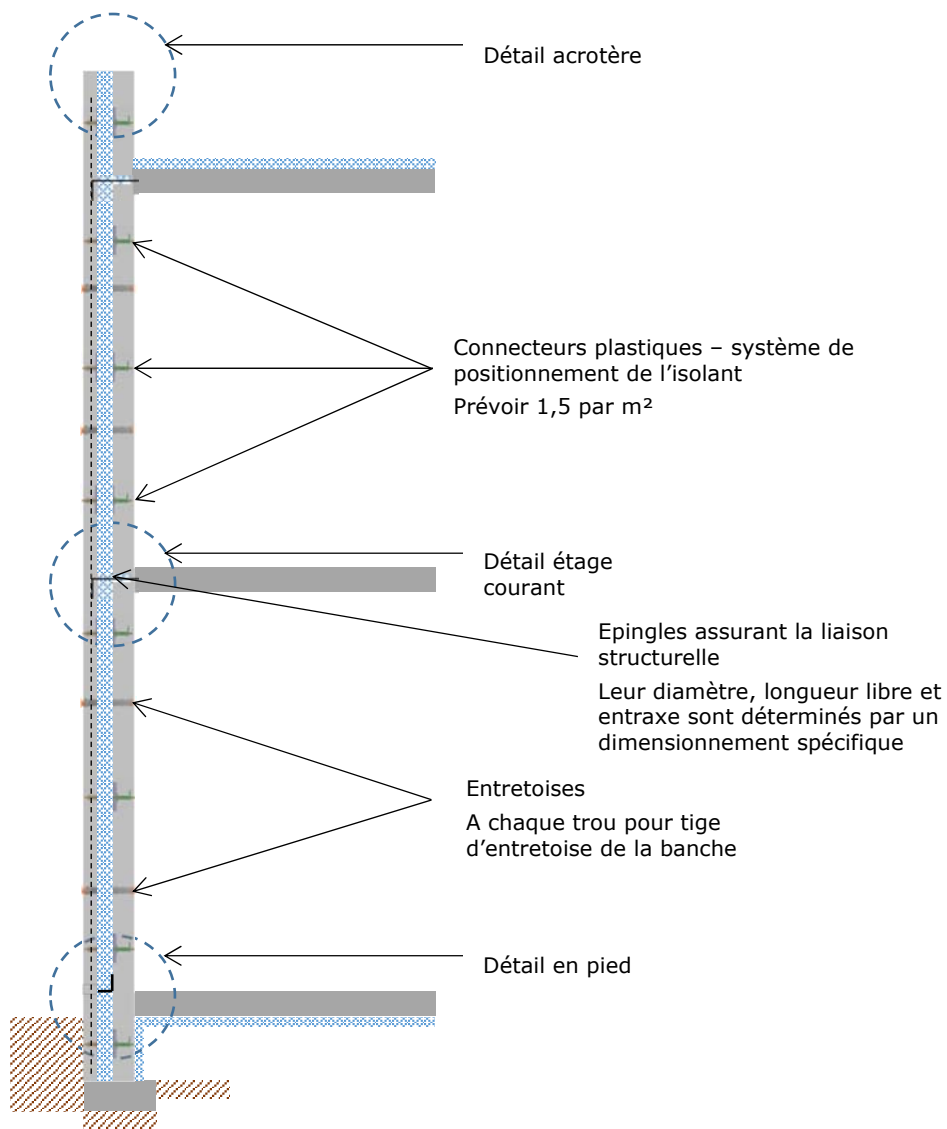
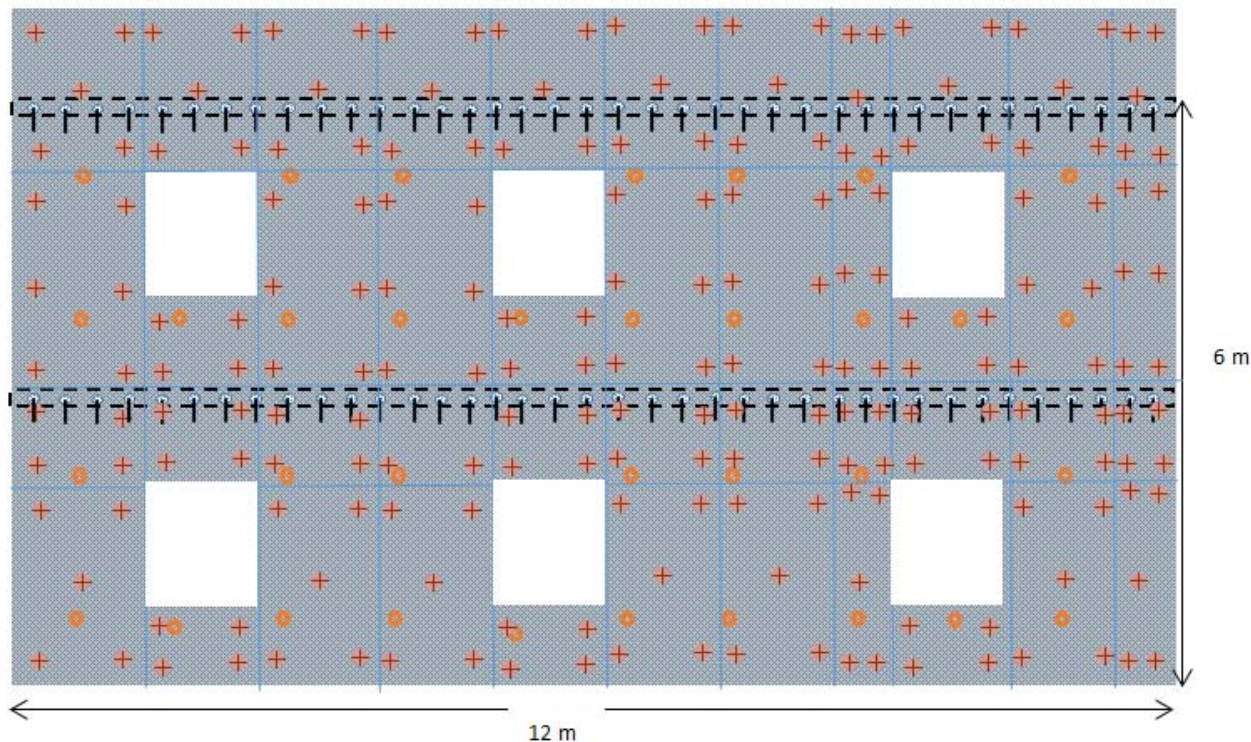
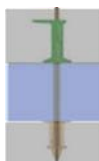


Figure 25 – Exemple de répartition des connecteurs plastiques, des entretoises et des épingles. Vue en élévation



Pièces plastique

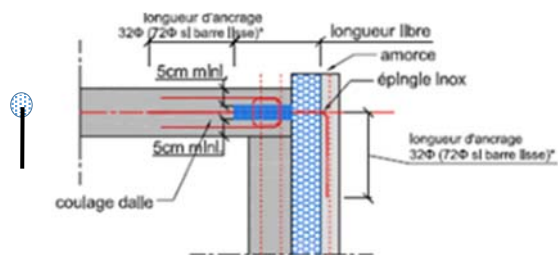


Connecteurs plastiques – système de positionnement de l’isolant
Selon les dimensions des panneaux



Entretoises
A chaque trou pour tige d’entretoise de la banche

Épingles de liaison – accrochage peau extérieure



Épingles assurant la liaison structurelle
Leur diamètre, longueur libre et entraxe sont déterminés par un dimensionnement spécifique

- **Détails des joints**

Figure 26 – Joint vertical de la peau extérieure

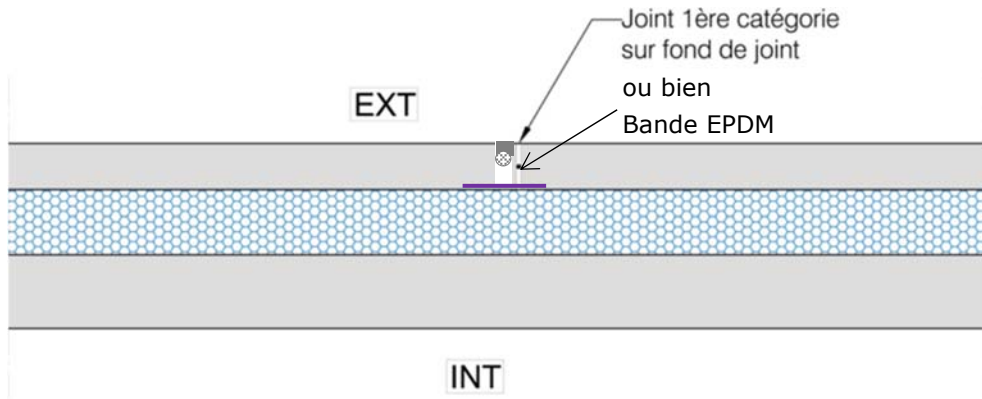


Figure 27 – Joint vertical de la peau extérieure

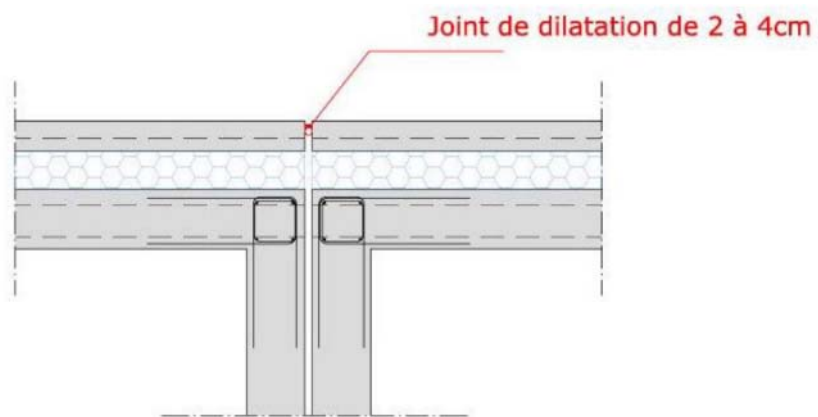
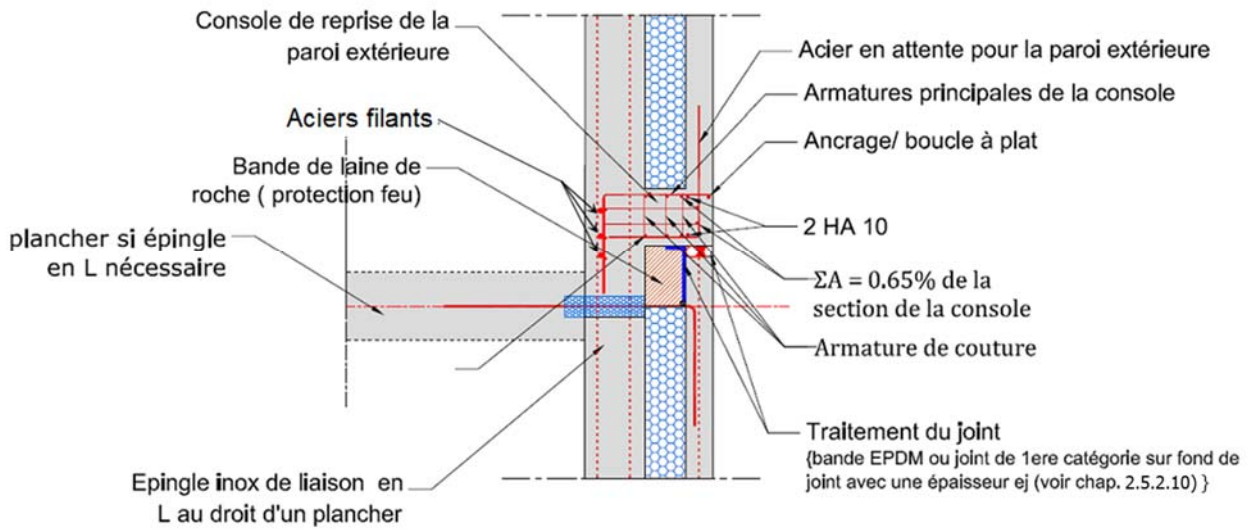
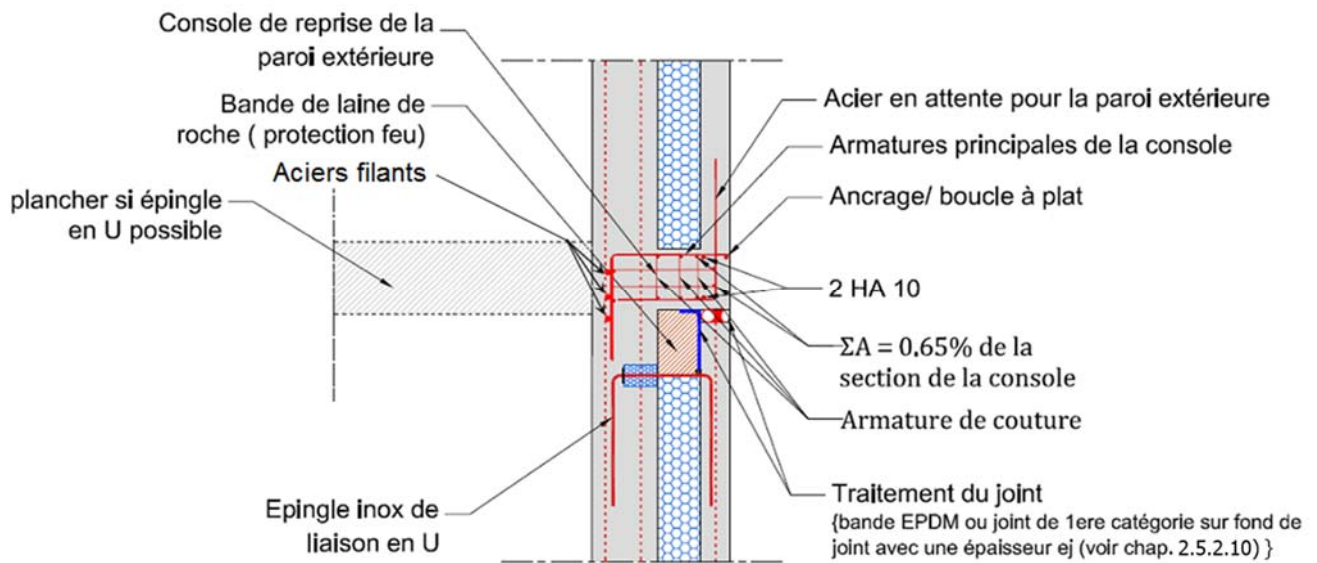


Figure 28 – Joints horizontaux de la peau extérieure, tous les 25,00 m de hauteur, dans le cas d'épingles en L.



Bande de laine de roche conforme à l'appréciation de laboratoire n° AL16-176_V2)

Figure 29 – Joints horizontaux de la peau extérieure, tous les 25,00 m de hauteur, dans le cas d'épingles en U.



Bande de laine de roche conforme à l'appréciation de laboratoire n° AL16-176_V2)

- **Possibilités de protection au feu de l'isolant (conformément à l'appréciation de laboratoire n° AL 16-176_V2).**

SOLUTION 1 : Bandes de laine de roche au pourtour des ouvertures

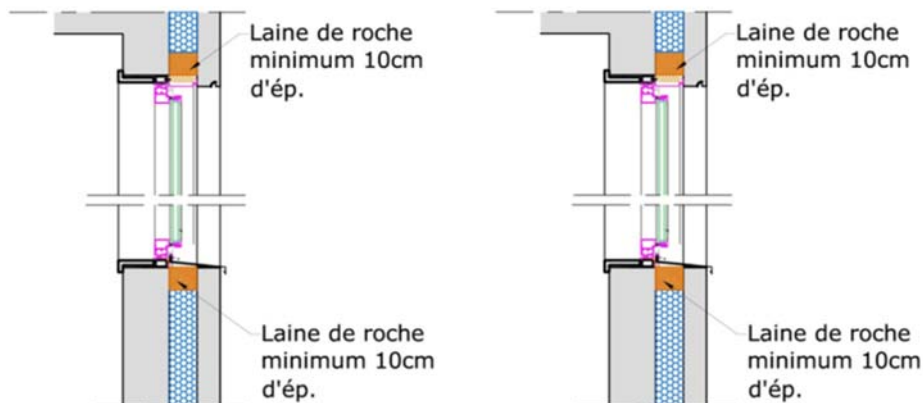


Figure 30 – Bande laine de roche ouvertures - Coupes verticales

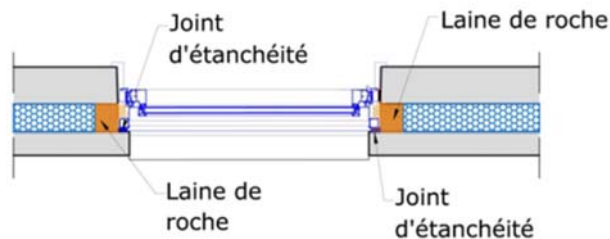


Figure 31 – Bande laine de roche ouvertures - Coupe horizontale

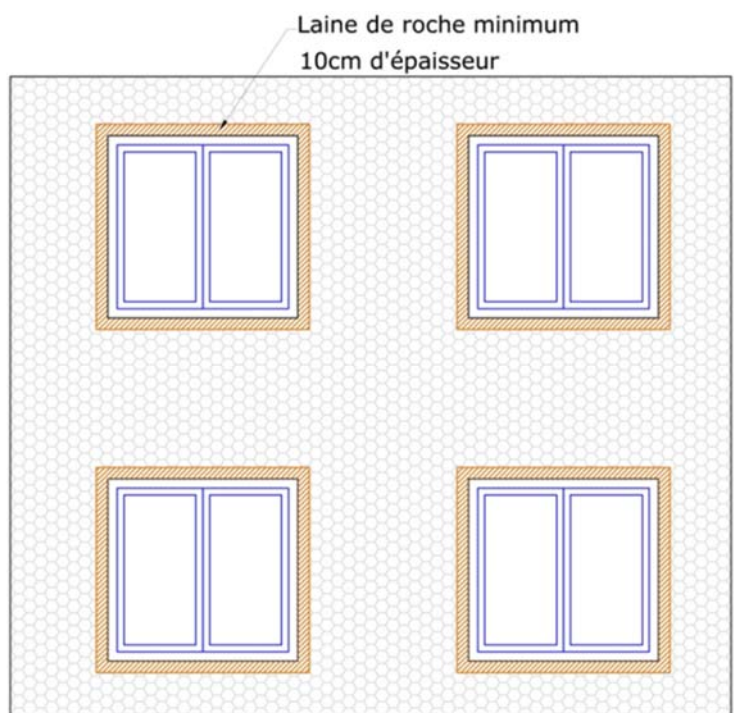


Figure 32 – Bande laine de roche ouvertures - Coupe transversale

SOLUTION 2 : Bandes de protection horizontale filante sur tout l'étage

Figure 33 – Bande laine de roche étage - Coupes verticales

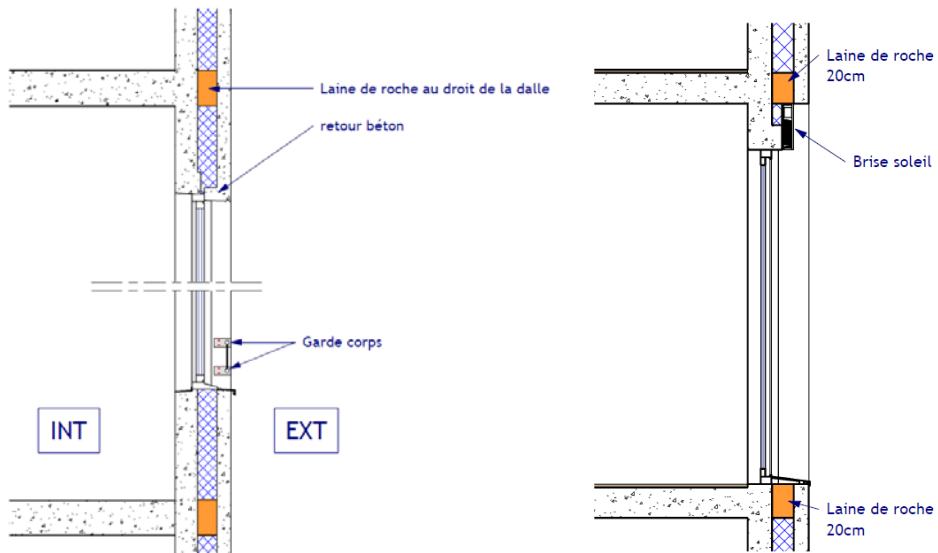
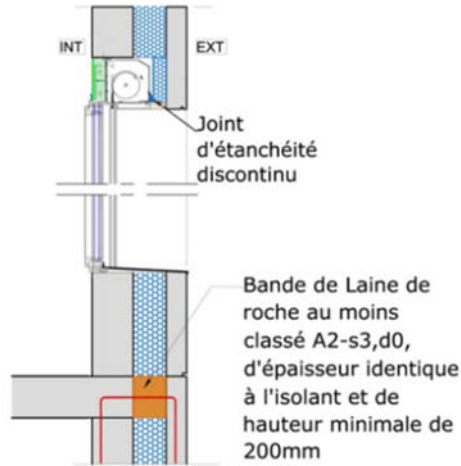


Figure 34 – Bande laine de roche étage - Coupes horizontales

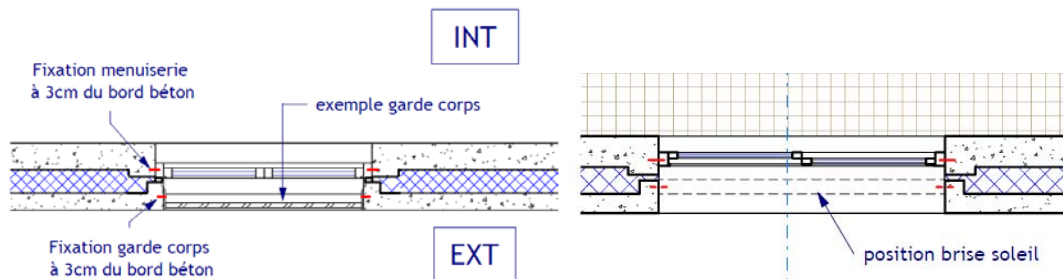
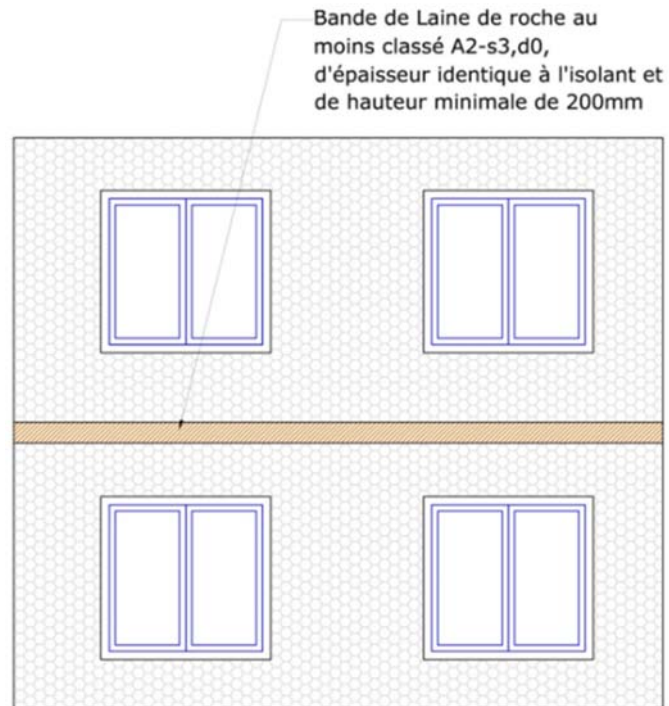


Figure 35 – Bande laine de roche étage - Coupe transversale



SOLUTION 3 : Retour béton au pourtour des ouvertures

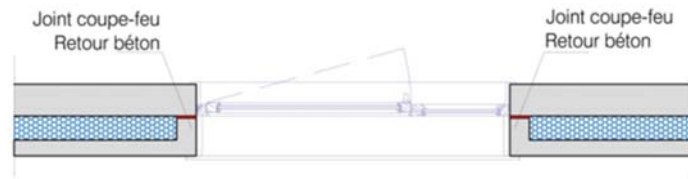


Figure 36 – Retour béton ouvertures - Coupe horizontale

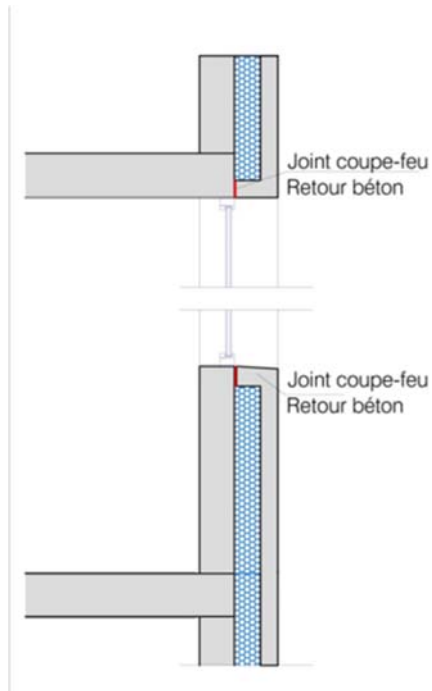


Figure 37 – Retour béton ouvertures - Coupe verticale

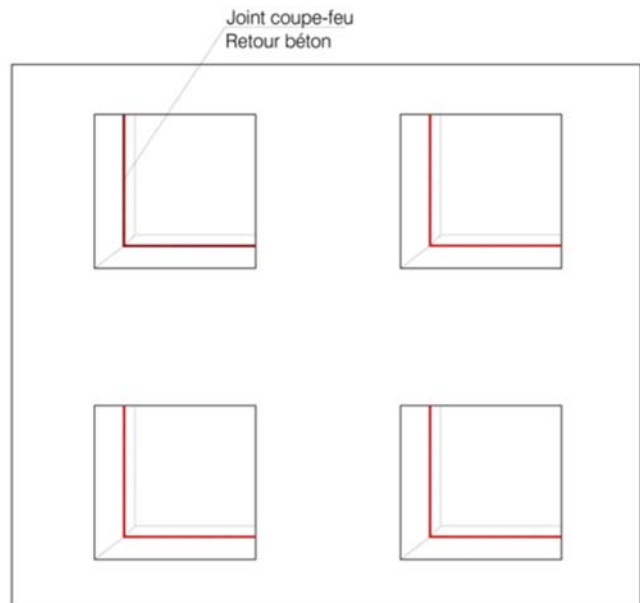
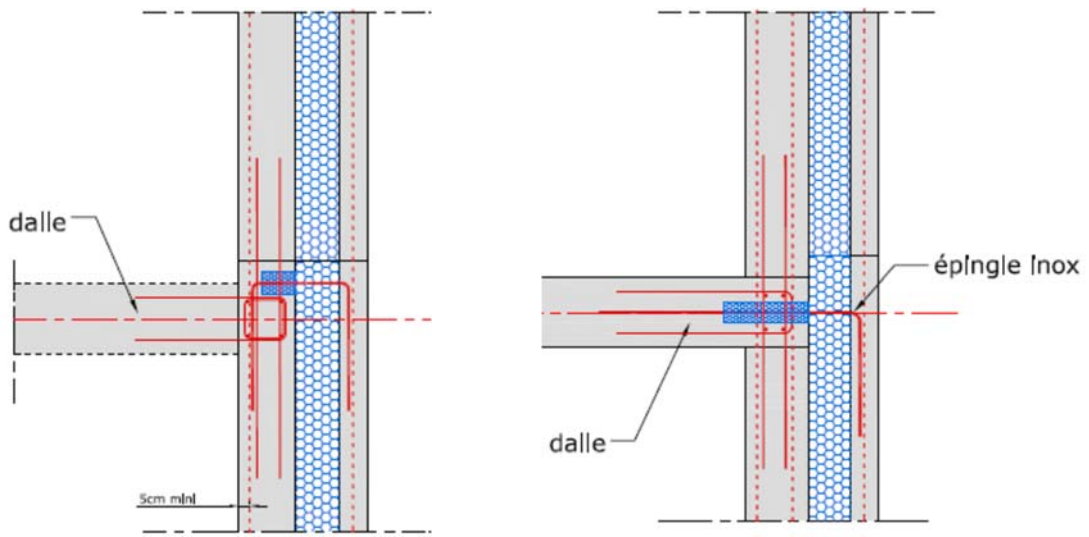


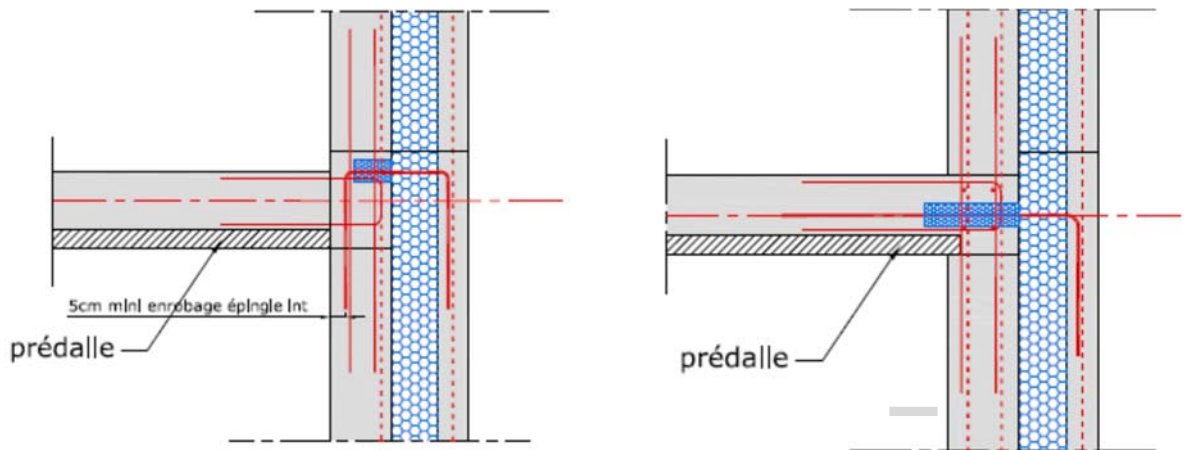
Figure 38 – Retour béton ouvertures - Coupe transversale

- **Liaisons courantes façade/plancher**

Figure 39 – Liaisons courantes façade/plancher

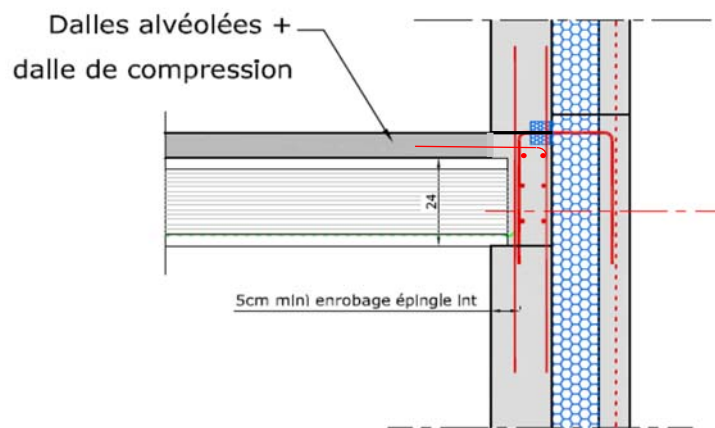


Dalle pleine coulée en place



Hors zone sismique

Plancher prédalles



Plancher dalles alvéolées

- Acrotères

Figure 40 – Principe d'isolation d'un acrotère avec retour de l'isolant sur toute la hauteur

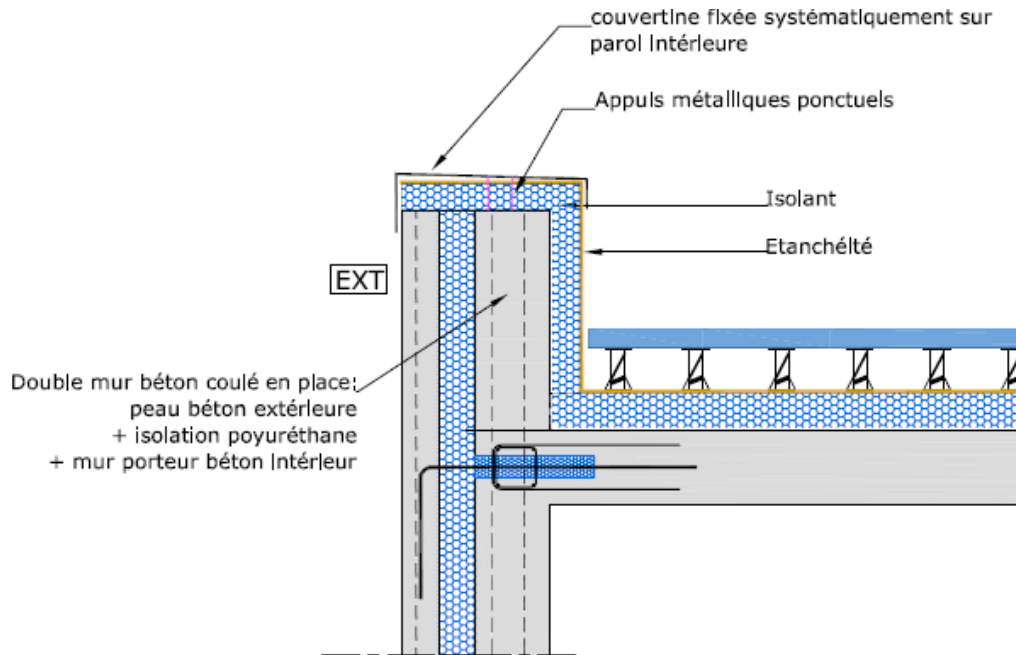
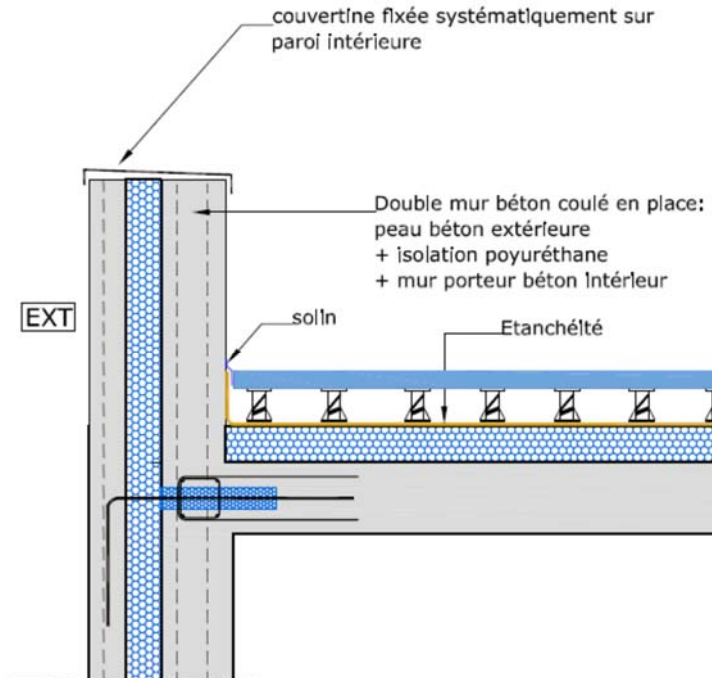


Figure 41 – Acrotère sans retour de l'isolant sur la hauteur



• **Détail en pied de mur (évacuation des eaux infiltrées ou condensées)**

Figure 42 – Détail en pied de mur dans le cas de soubassements inférieurs à 1 m

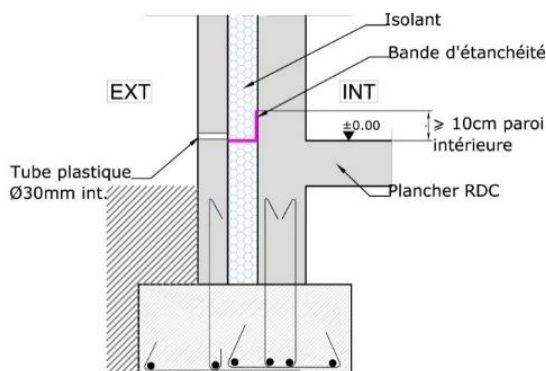
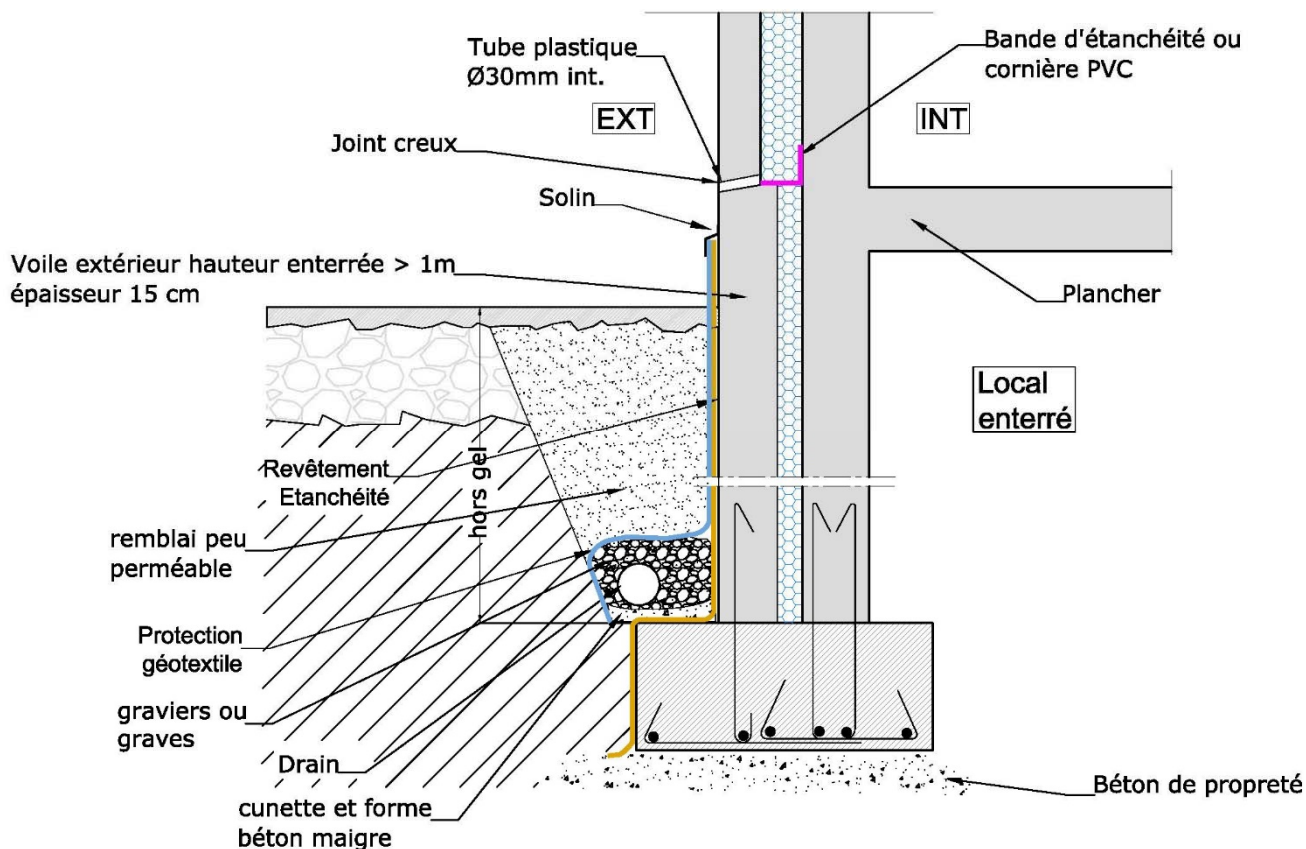


Figure 43 – Détail du traitement des murs enterrés



Détail consoles de reprise des charges verticales

Figure 44 – Détail de reprise par consoles en pied de mur

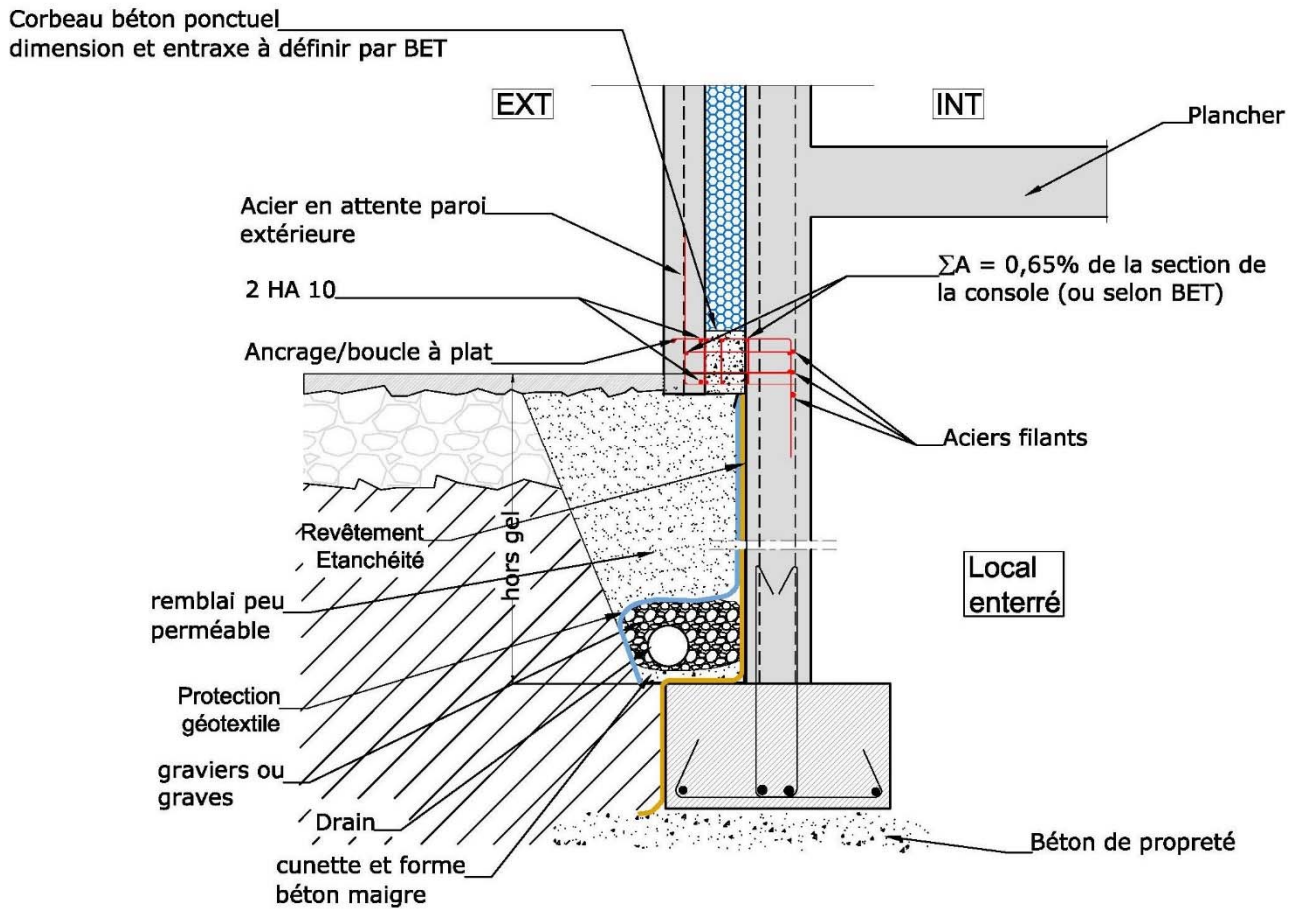
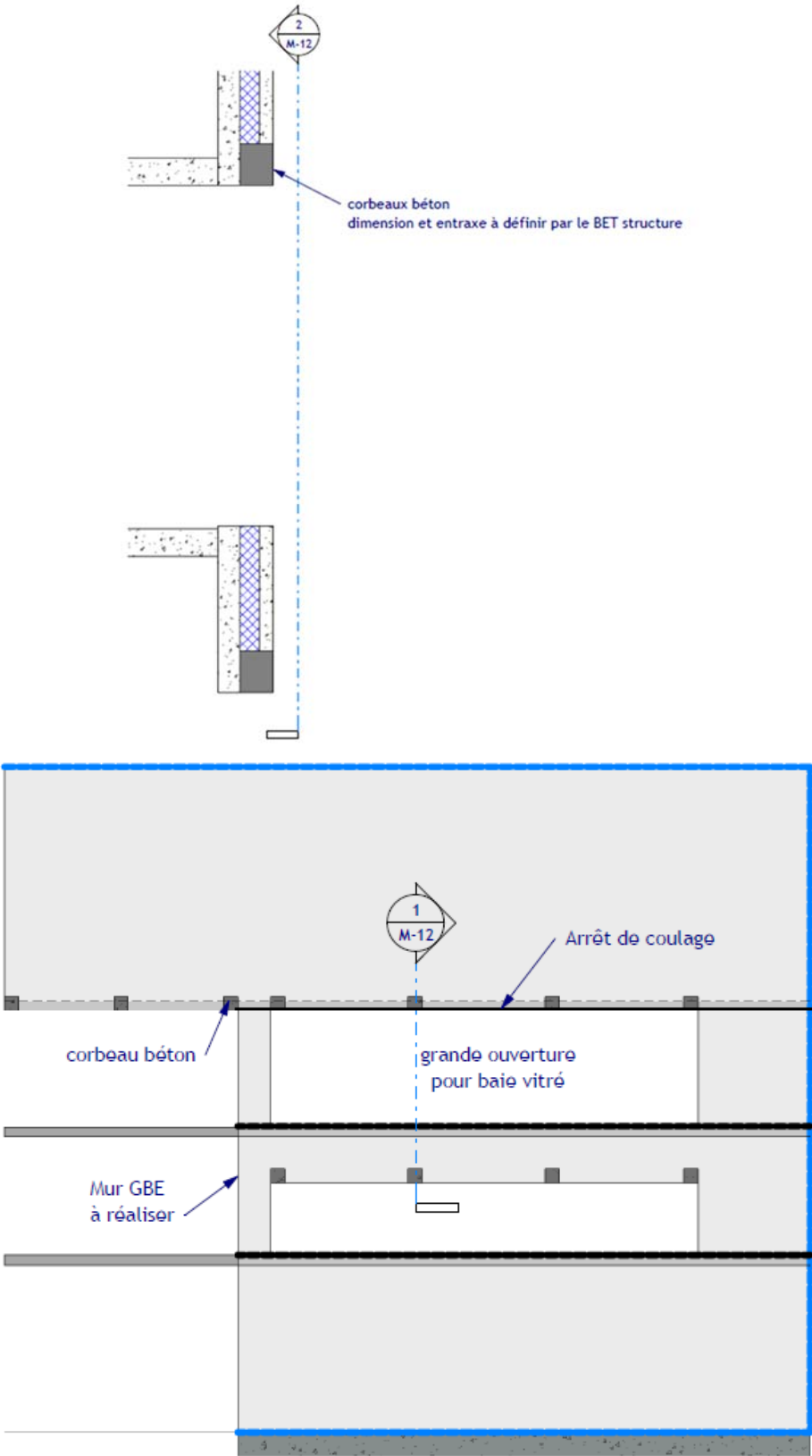


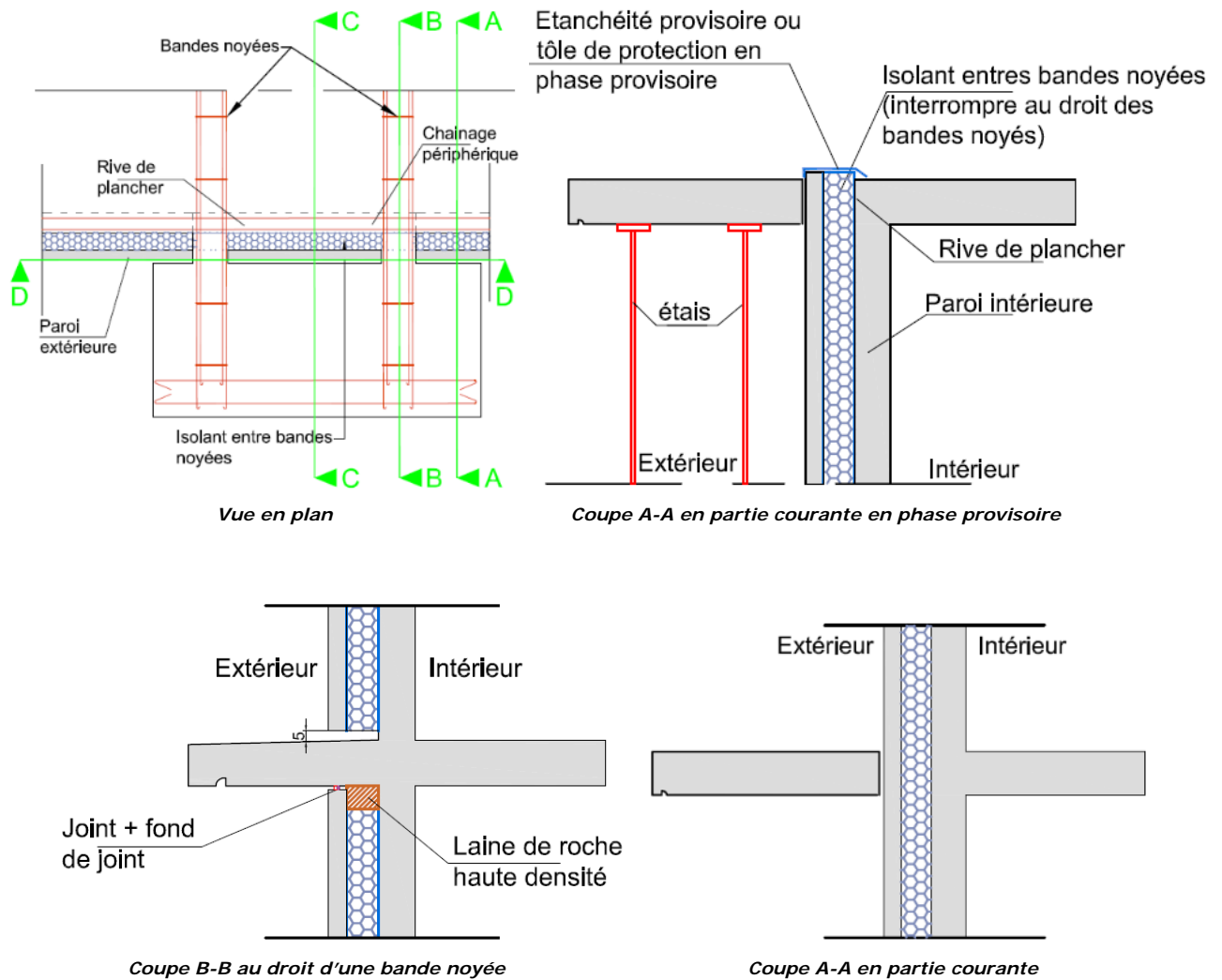
Figure 45 – Détail de reprise par consoles pour grandes ouvertures

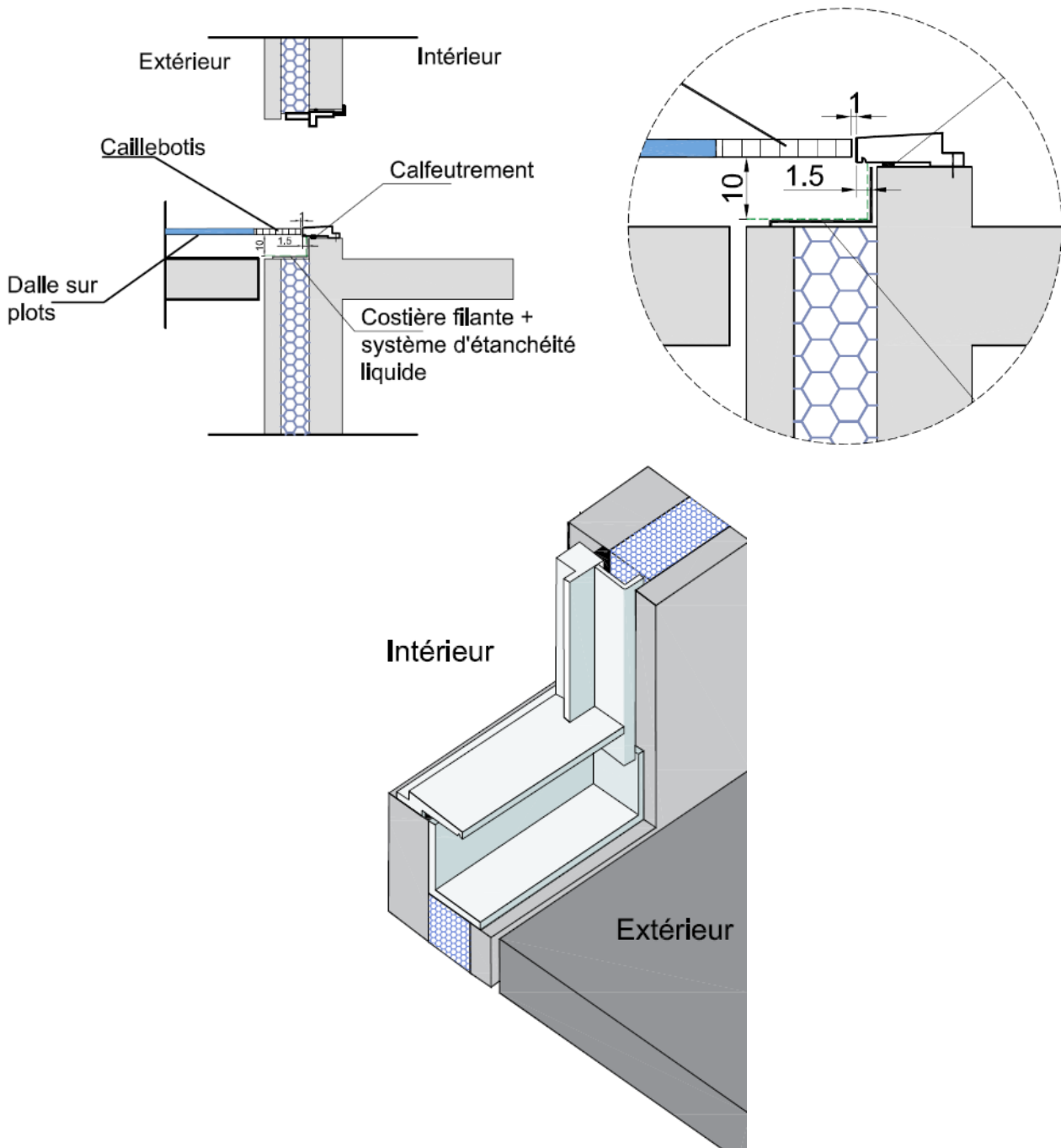


• **Balcons**

a) **Balcon filant devant la paroi extérieure sur bandes noyées en console**

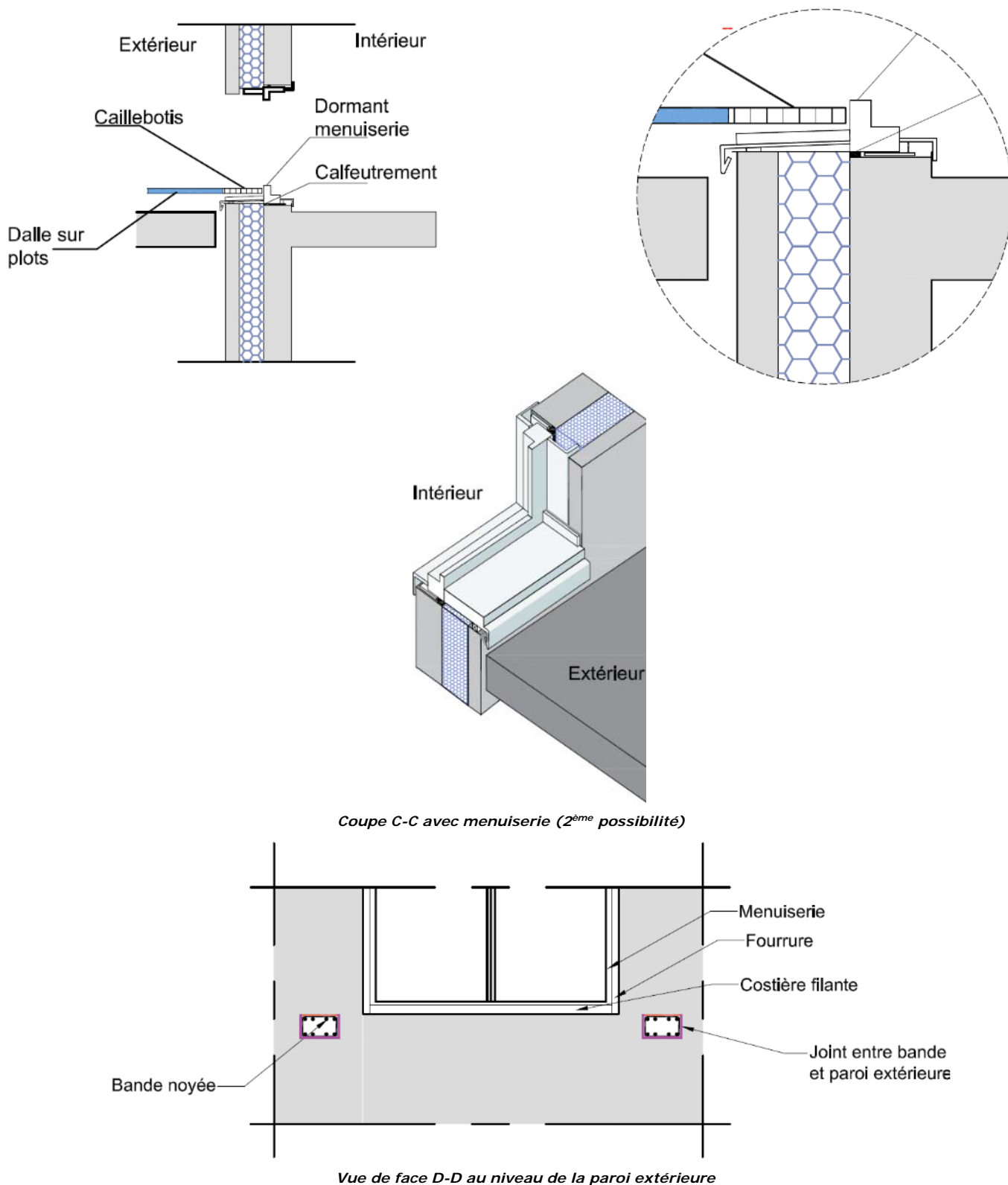
Figure 46 – Balcon filant devant la paroi extérieure sur bandes noyées en console (mise en œuvre de la bande en laine de roche conforme à l'appréciation de laboratoire n° AL 16-176 V2)





Coupe C-C avec menuiserie (1^{ère} possibilité)

Figure 47 – Balcon filant devant la paroi extérieure sur bandes noyées en console (suite)

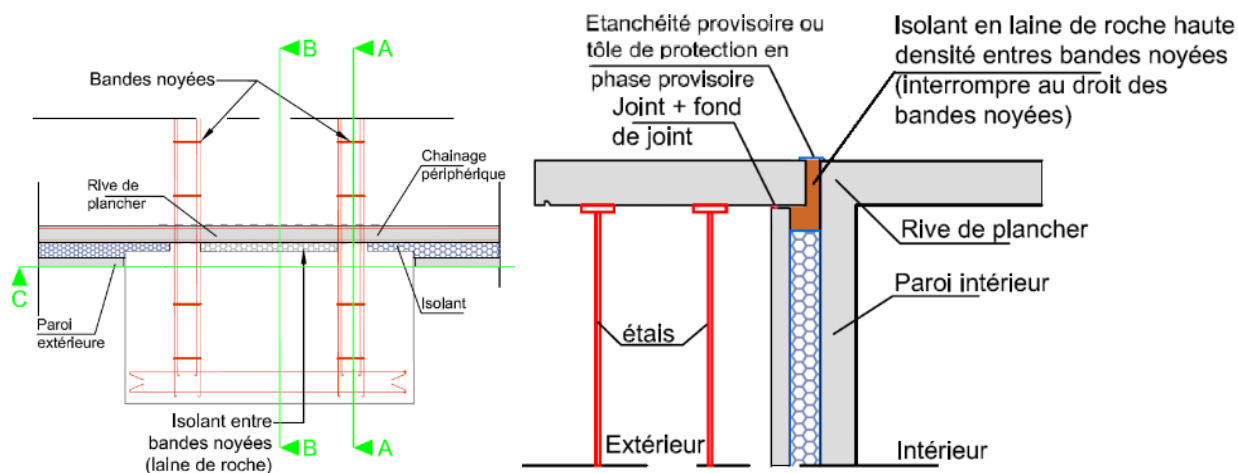


Le cas échéant, cette disposition ne préjuge pas du C+D. Il convient d'en tenir compte dans la mise en œuvre des ouvrants

Figure 48 – Balcon filant devant la paroi extérieure sur bandes noyées en console (suite)

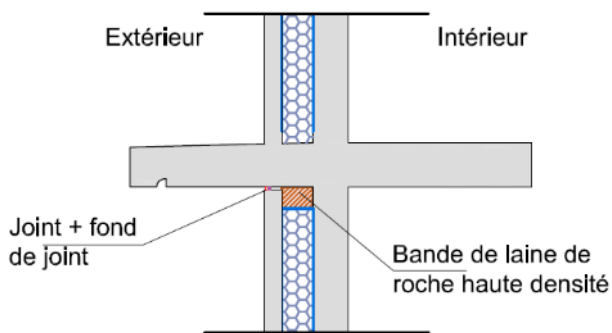
b) Balcon sur bandes noyées en console (mise en œuvre de la bande en laine de roche selon conforme à l'appréciation de laboratoire n° AL 16-176_V2)

Figure 49 – Balcon sur bandes noyées en console

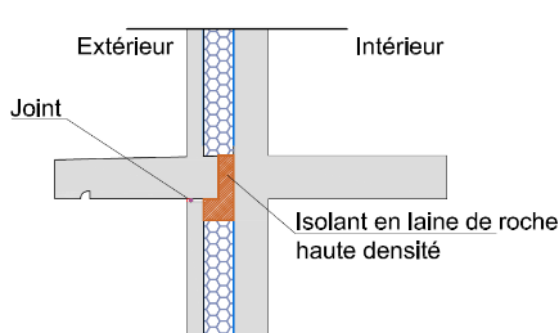


Vue en plan

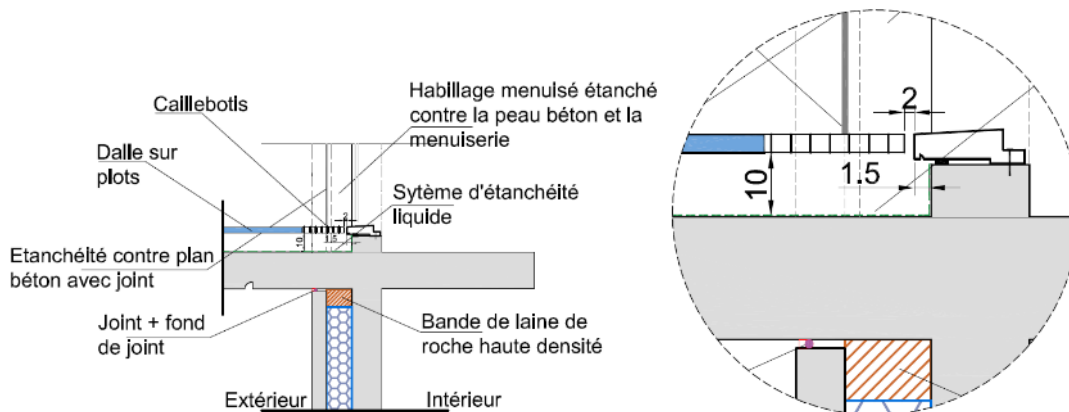
Coupe B-B en partie courante en phase provisoire



Coupe A-A au droit d'une bande noyée



Coupe B-B en partie courante



Coupe A-A au droit d'une bande noyée avec menuiserie

Figure 50 – Balcon sur bandes noyées en console (mise en œuvre de la bande en laine de roche selon conforme à l'appréciation de laboratoire n° AL 16-176_V2)

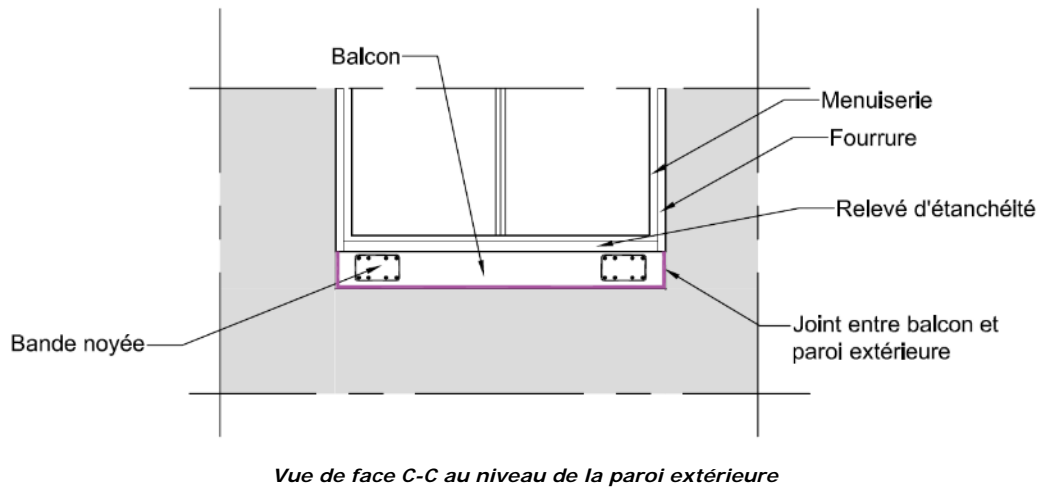
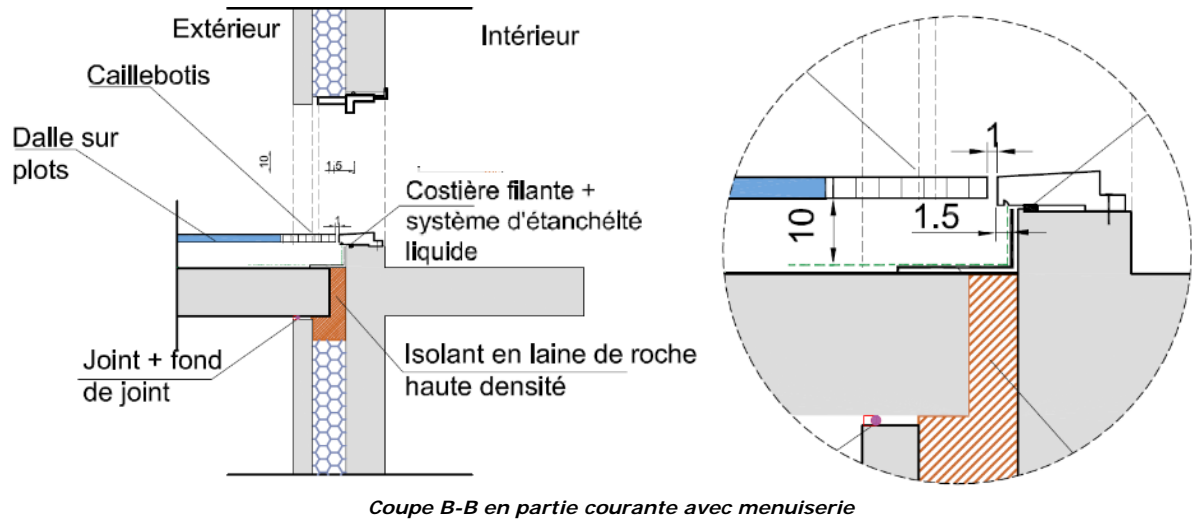


Figure 51 – Balcon sans traitement du pont thermique (mise en œuvre de la bande en laine de roche selon conforme à l'appréciation de laboratoire n° AL 16-176_V2)

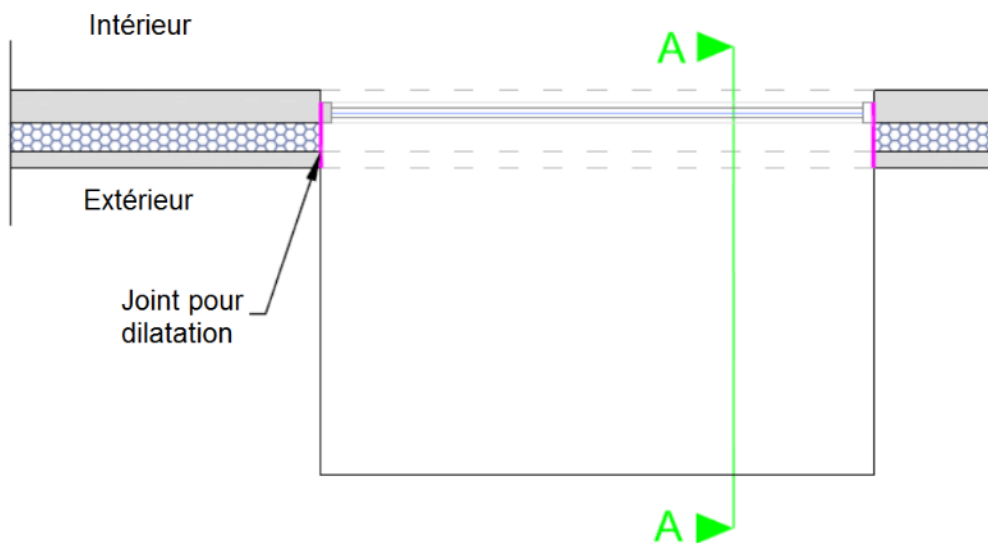
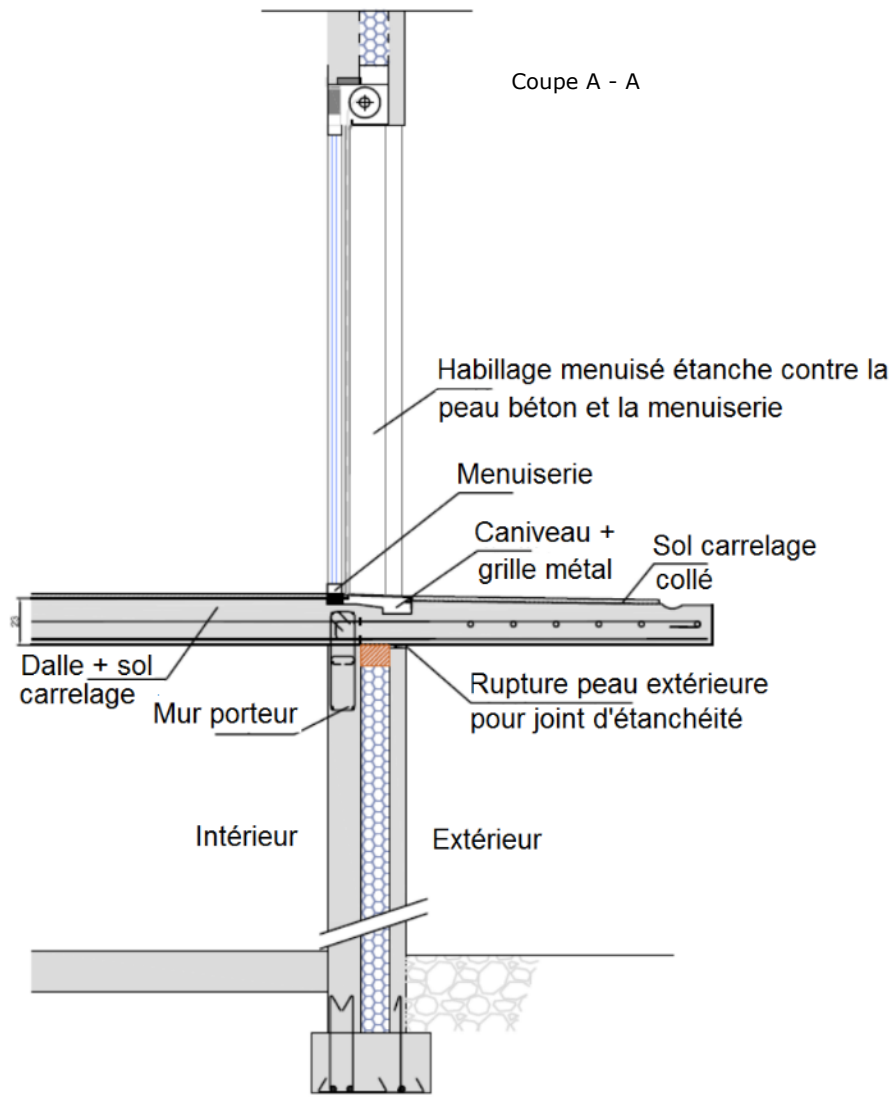
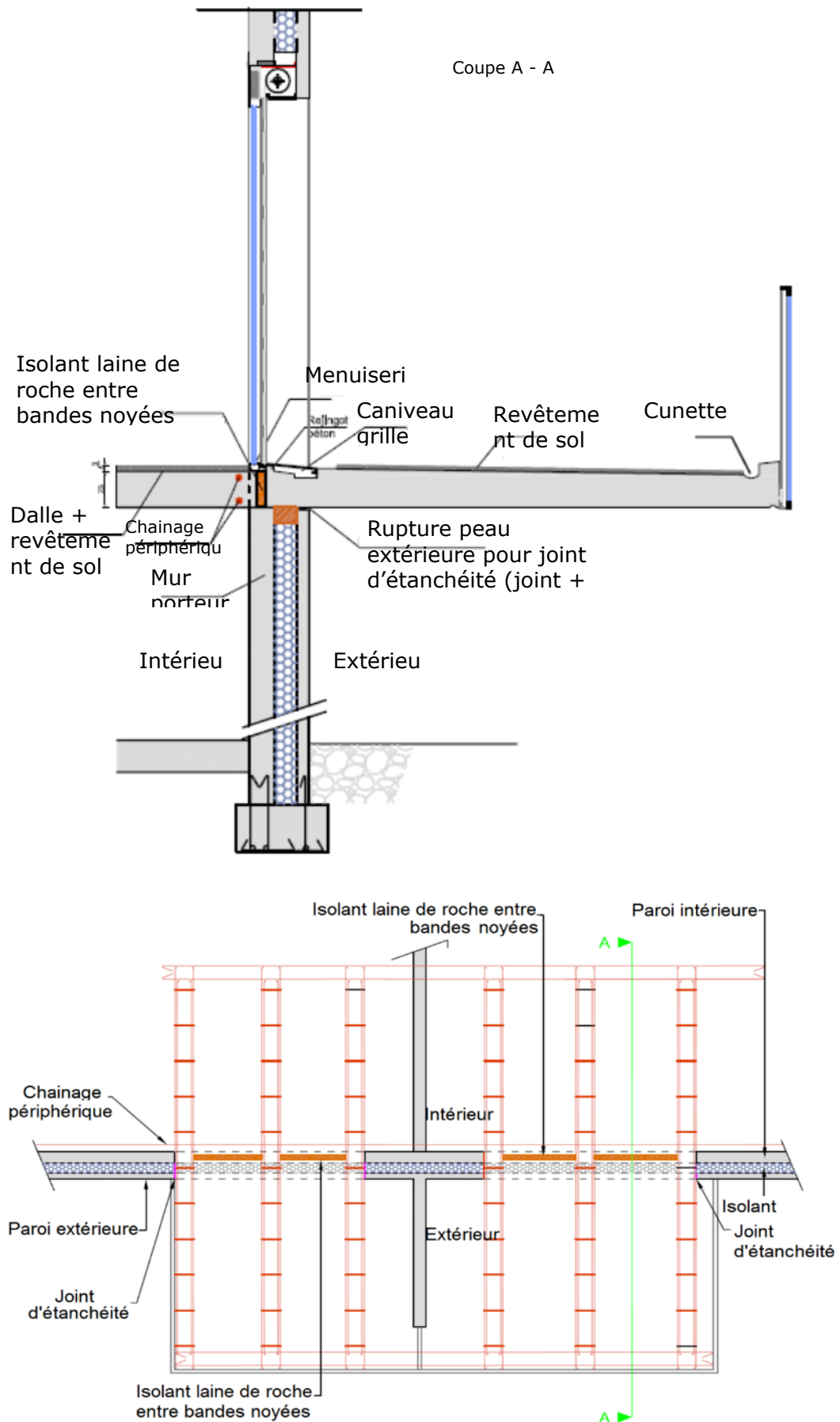


Figure 52 – Balcon sur bandes noyées en console (mise en œuvre de la bande en laine de roche selon conforme à l'appréciation de laboratoire n° AL 16-176_V2)



Annexe XVIII : Exemple de fiche d'autocontrôle



CONTROLE JOURNALIER DE LA REALISATION DES MURS SELON PROCEDE GBE®

Date :

Ouvrage :

Vérificateur :

La mise en œuvre est effectuée par une équipe formée

	Référence	points de contrôles	Vérification	Conforme	Action corrective	Vérification finale
Implantation murs et mannequins	Plans de coffrage	- Implantation des murs - Position et fixations des mannequins				
Incorporation des CES	Plans CES	- Pas d'obstacle à la mise en place du béton - Pas d'affaiblissement local significatif de la résistance				
Armatures paroi intérieure porteuse	Plans d'armatures	- Présence des armatures prévues - calage				
Position et calage - Isolant	Mode opératoire Procédé GBE	- Vérification des 3 épaisseurs (mur int, isol et mur ext) - continuité et alignement de l'isolant - Vérification tenue de l'isolant - barrière d'étanchéité en pied de mur				
Plan de calepinage des panneaux d'isolant et des pièces plastiques	Suivant les prescriptions de l'Atec	- Plan de calepinage établi avant la mise en œuvre				
Implantation des panneaux d'isolant des dagues	Plan de calepinage	- pièces plastiques en nombre suffisant - Implantation correcte				
Epingles inox	Plans d'armatures	- En acier inox - Section - Entraxe - Longueur libre - positionnement				
Armatures parement extérieur	Plans d'armatures	- Présence des armatures prévues				
Epaisseur enrobages aciers	Plans d'armatures	- Respect de l'enrobage minimum - A mi-épaisseur de la peau extérieure				
Laine de roche si nécessaire	Mode opératoire Procédé GBE	Respect d'une des 3 dispositions : - Bandes de laine roche au pourtour des ouvertures - Bandes de laine de roche à chaque étage devant de nez de plancher - Retour béton au pourtour des ouvertures				
Fermeture coffrage		- Etanchéité des coffrages - Verticalité des banquettes - Etat de la face coffrante - Produit de démoulage - Stabilité des banquettes				
Coulage	Atec GBE et préconisation du fournisseur de béton	- Conformité du béton (bon de livraison - test d'étalement) - Coulage simultané sans différence de hauteur de + de 50 cm - Vérification de l'étanchéité du coffrage (absence de fuite)				
Décoffrage		Selon Mode Opératoire de l'entreprise et maturité du béton (voir normes P18-504 et NF EN 13670)				
Aspect - Finition	CCTP	Selon C.C.T.P.				

Annexe XIX : Distribution des températures dans le voile intérieur (conformément à l'appréciation de laboratoire n° AL16-176_V2)

Tableau 16 - Températures (°C) dans le voile exposé du procédé de double mur isolé GBE après 30 minutes d'exposition à l'incendie conventionnel ISO R834.

Distance à la face exposée [cm]		0	0,5	1	2	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	35	40	45		
Épaisseur du voile intérieur [cm]	10	750	622	518	365	261	188	101	60	48															
	12	750	622	518	365	261	188	99	55	35	30														
	14	750	622	518	365	261	187	99	54	34	25	23													
	16	750	622	518	365	261	187	99	54	34	25	22	21												
	18	750	622	518	365	261	187	99	54	34	25	22	20	20											
	20	750	622	518	365	261	187	99	54	34	25	22	20	20	20										
	22	750	622	518	365	261	187	99	54	34	25	22	20	20	20	20									
	24	750	622	518	365	261	187	99	54	34	25	22	20	20	20	20	20								
	26	750	622	518	365	261	187	99	54	34	25	22	20	20	20	20	20	20							
	28	750	622	518	365	261	187	99	54	34	25	22	20	20	20	20	20	20	20						
	30	750	622	518	365	261	187	99	54	34	25	22	20	20	20	20	20	20	20	20					
	35	750	622	518	365	261	187	99	54	34	25	22	20	20	20	20	20	20	20	20	20				
	40	750	622	518	365	261	187	99	54	34	25	22	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20			
	45	750	622	518	365	261	187	99	54	34	25	22	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20

Tableau 17 - Températures (°C) dans le voile exposé du procédé de double mur isolé GBE 60 minutes d'exposition à l'incendie conventionnel ISO R834.

Distance à la face exposée [cm]		0	0,5	1	2	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	35	40	45	
Épaisseur du voile intérieur [cm]	10	895	785	690	536	423	337	225	166	148														
	12	895	784	688	534	418	330	211	141	104	92													
	14	895	784	688	533	417	329	207	133	89	65	58												
	16	895	784	688	533	417	328	207	132	85	58	43	39											
	18	895	784	688	533	417	328	206	131	85	56	40	31	29										
	20	895	784	688	533	417	328	206	131	84	56	39	30	25	24									
	22	895	784	688	533	417	328	206	131	84	56	39	29	25	22	22								
	24	895	784	688	533	417	328	206	131	84	56	39	29	24	22	21	21							
	26	895	784	688	533	417	328	206	131	84	56	39	29	24	22	21	20	20						
	28	895	784	688	533	417	328	206	131	84	56	39	29	24	22	21	20	20	20					
	30	895	784	688	533	417	328	206	131	84	56	39	29	24	22	21	20	20	20	20				
	35	895	784	688	533	417	328	206	131	84	56	39	29	24	22	21	20	20	20	20	20			
	40	895	784	688	533	417	328	206	131	84	56	39	29	24	22	21	20	20	20	20	20	20		
	45	895	784	688	533	417	328	206	131	84	56	39	29	24	22	21	20	20	20	20	20	20	20	20

Tableau 18 - Températures (°C) dans le voile exposé du procédé de double mur isolé GBE après 90 minutes d'exposition à l'incendie conventionnel ISO R834.

Distance à la face exposée [cm]		0	0,5	1	2	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	35	40	45			
Épaisseur du voile intérieur [cm]	10	971	875	789	645	533	446	330	268	248																
	12	970	872	783	636	520	429	302	224	182	168															
	14	970	871	782	633	516	423	291	206	153	123	114														
	16	970	871	781	632	515	422	288	199	141	104	84	77													
	18	970	870	781	632	514	421	287	197	137	98	72	58	54												
	20	970	870	781	632	514	421	286	197	136	96	68	51	42	39											
	22	970	870	781	632	514	421	286	197	136	95	67	49	38	32	30										
	24	970	870	781	632	514	421	286	197	136	95	67	49	37	30	27	25									
	26	970	870	781	632	514	421	286	197	136	95	67	49	37	30	25	23	23								
	28	970	870	781	632	514	421	286	197	136	95	67	49	37	30	25	23	22	21							
	30	970	870	781	632	514	421	286	197	136	95	67	49	37	30	25	23	21	21	21						
	35	970	870	781	632	514	421	286	197	136	95	67	49	37	30	25	23	21	21	20	20					
	40	970	870	781	632	514	421	286	197	136	95	67	49	37	30	25	23	21	21	20	20	20				
	45	970	870	781	632	514	421	286	197	136	95	67	49	37	30	25	23	21	21	20	20	20	20			

Tableau 19 - Températures (°C) dans le voile exposé du procédé de double mur isolé GBE après 120 minutes d'exposition à l'incendie conventionnel ISO R834.

Distance à la face exposée [cm]		0	0,5	1	2	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	35	40	45		
Épaisseur du voile intérieur [cm]	10	1022	938	860	727	620	536	420	358	338															
	12	1021	933	851	711	599	509	380	299	255	241														
	14	1020	930	848	705	590	497	361	271	214	182	172													
	16	1020	930	846	703	587	493	353	259	195	153	130	123												
	18	1020	929	846	702	585	491	350	253	186	140	110	93	88											
	20	1020	929	846	702	585	490	349	252	183	135	102	80	67	63										
	22	1020	929	846	702	585	490	349	251	182	133	98	74	59	50	47									
	24	1020	929	846	702	585	490	349	251	182	133	97	72	55	44	38	36								
	26	1020	929	846	702	585	490	349	251	182	132	97	72	54	42	35	31	30							
	28	1020	929	846	702	585	490	349	251	182	132	97	72	54	42	34	29	26	25						
	30	1020	929	846	702	585	490	349	251	182	132	97	72	54	42	34	28	25	24	23					
	35	1020	929	846	702	585	490	349	251	182	132	97	72	54	42	33	28	25	23	22	21				
	40	1020	929	846	702	585	490	349	251	182	132	97	72	54	42	33	28	25	23	22	20	20			
	45	1020	929	846	702	585	490	349	251	182	132	97	72	54	42	33	28	25	23	22	20	20	20		