Disclaimer

La présente fiche s'adresse aux concepteurs, aux prescripteurs et aux équipes de projets de construction désireux de réemployer le matériau ou produit de construction concerné. Elle fait partie d'une collection de fiches visant à rassembler les informations disponibles à ce jour et susceptibles de faciliter le réemploi des matériaux et produits de construction.

Cette fiche a été réalisée par Bellastock dans le cadre du projet Interreg FCRBE - Facilitating the Circulation of Reclaimed Building Elements, soutenu par l'ensemble des partenaires du projet. Les sources d'information incluent l'expérience des fournisseurs professionnels de matériaux de réemploi et des partenaires du projet impliqués, les leçons tirées de projets exemplaires, la documentation technique disponible, etc.

Les fiches ont été réalisées entre 2019 et 2021. Le secteur du réemploi étant en pleine évolution, certaines informations, notamment celles concernant les prix et la disponibilité, sont susceptibles de varier au cours du temps.

Lorsque le texte fait référence à des normes européennes, il appartient aux auteurs de projet de se référer, le cas échéant, à leurs transpositions nationales ainsi qu'aux spécificités locales.

Il est important de noter que les informations présentées ici ne sont pas exhaustives et ne visent pas à remplacer l'expertise des professionnels. Les questions spécifiques sont toujours liées à un projet et doivent être traitées comme telles.

La collection complète des fiches (y compris la fiche d'introduction générale) est disponible gratuitement sur différents sites de référence (e.a. opalis.eu, nweurope.eu/fcrbe, futureuse.co.uk).

Un répertoire non exhaustif de fournisseurs de matériaux de construction de réemploi est disponible sur www.opalis.eu et www.salvoweb.com.

Partenariat Interreg FCRBE : Bellastock (FR), le Centre Scientifique et Technique de la Construction / CSTC (BE), Bruxelles Environnement (BE), le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment / CSTB (FR), la Confédération de la Construction (BE), Rotor (BE), Salvo (UK) et l'Université de Brighton (UK).

Les informations contenues dans ce document ne reflètent pas forcément la position de l'ensemble des partenaires du projet FCRBE ni celle des autorités de financement.

Sauf mention contraire explicite, le contenu de ces fiches est crédité au format Creative Commons Attribution - Non Commercial - Share Alike format (CCBY-NC-SA).

Sauf mention explicite, les images utilisées dans ce document appartiennent à © Bellastock. Les autres images ont fait l'objet d'une demande systématique d'autorisation auprès de leurs auteurs ou ayants droit. Lorsque celle-ci est restée sans réponse, nous avons présumé que l'utilisation projetée de l'image ne posait pas d'objection. Si cette interprétation vous paraît abusive, merci de nous le signaler.

Iconographie

Figures 1 à 8 : Guide méthodologique et technique pour le réemploi de béton en murs, Rédacteur Etienne Prat, CSTB. Dans *REPAR#2 Le réemploi passerelle entre architecture et industrie*, mars 2018, BENOIT J, SAUREL G, BILLET M, BOUGRAIN F, LAURENCEAU S, ADEME, BELLASTOCK, CSTB.

Description du matériau

Les murs ou voiles en béton désignent des parties d'ouvrages pleines et verticales, en béton armé, préfabriquées ou coulées directement sur place (béton banché).

Selon leur usage, ils peuvent être qualifiés de :

→ *voiles porteurs* (ou autoportants). Ils contribuent à la stabilité de l'édifice en supportant principalement des charges verticales (e.a. voiles extérieurs, murs de refend, etc.)

→ *voiles non porteurs*. Ils ne reprennent pas d'autres charges que leur poids-propre (e.a. cloisonnements intérieurs, etc.).

On parle de « voile » lorsque la longueur de l'élément est égale à au moins 4 fois son épaisseur. L'épaisseur varie en fonction de la charge à reprendre, avec un minimum de 15 cm pour les voiles exposés aux intempéries. Une épaisseur comprise entre 10 et 15 cm peut néanmoins être admise sur des surfaces limitées pour autant qu'elle reste compatible avec les dispositions constructives de ferraillage.

Les voiles *intérieurs*, comme les murs de refends et les murs situés de part et d'autre d'un joint de dilatation, ne sont pas exposés à la pluie. Ils se distinguent des voiles *extérieurs* dont l'étanchéité à la pluie est généralement assurée par un revêtement étanche.

De manière générale, les voiles récupérés en vue d'un réemploi se présentent sous la forme de panneaux de forme rectangulaire pouvant aller jusqu'à 3 × 2m.

Les voiles en béton ne sont pas un produit couramment disponible sur le marché du réemploi. Il est toutefois possible d'entreprendre une démarche de réemploi spécifique, dans le contexte d'un projet donné et à l'initiative des commanditaires et des concepteurs.

Plusieurs éléments d'architecture sont susceptibles d'être réemployés en tant que voiles en béton :

→ *les voiles de refend intérieurs coulés sur place.* Il s'agit de murs structurels positionnés à l'intérieur des bâtiments, perpendiculairement à la façade. Les murs de refend travaillent en compression et sont généralement faiblement ferraillés. Les armatures sont situées au droit des ouvertures et aux extrémités des murs. Le fait qu'ils n'aient pas été exposés aux intempéries facilite leur réemploi.

Ces murs ont une épaisseur variable entre 15 et 20 cm, leur hauteur correspond le plus souvent à celle d'un étage, soit environ 250 cm dans un bâtiment de logement. Les surfaces de murs permettent de produire des éléments de taille variable suivant le calepinage souhaité et la classe d'usage. Le rapport épaisseur surface est à prendre en compte.

→ *les panneaux en béton préfabriqués.* L'usage régulier d'éléments préfabriqués en béton est apparu après la seconde guerre mondiale, dans un contexte de reconstruction à grande échelle. Dans la mesure où il y a eu une grande diversité de procédés de préfabrication, on retrouve une grande variété d'éléments, y compris au sein d'un même bâtiment : variété de formats, épaisseurs différentes selon les applications, variabilité de composition (densité des fers et armatures, avec ou sans parement, multicouches ou non, présence d'une couche isolante insérée dans le voile, etc.).

De manière générale, la présence plus importante de ferraillage (en particulier dans les panneaux de plus de 10 cm d'épaisseur) rend les opérations de découpe des panneaux préfabriqués plus compliquées. Lorsque c'est possible, le réemploi de l'élément dans son entièreté est à privilégier. Les éléments plus fins (par exemple, issus de cloisons intérieures) sont généralement moins ferraillés et se prêtent mieux à la découpe.

Concernant la *finition* des éléments en béton issus du réemploi, il faut distinguer l'état des surfaces après la collecte des éléments et les finitions souhaitées lors de la phase de préparation des matériaux en vue de leur réemploi. Les éléments en béton sont généralement collectés après la phase de curage, c'est-à-dire après la dépose des matériaux de second œuvre. Pour simplifier, dans un contexte de valorisation du béton par le recyclage, le curage a notamment comme objectif, de retirer tous les matériaux non inertes qui pourraient dégrader la qualité du béton en vue d'une valorisation optimale. Cette étape du chantier peut donc avoir un impact sur l'état des surfaces fini du béton.

Par ailleurs, la présence de substances dangereuses (e.a. amiante, plomb), entraîne dans la plupart des cas, des travaux de retrait de ces substances. Suivant leur localisation, ces travaux consistent à la dépose des revêtements et au ponçage des surfaces. Les travaux de désamiantage impactent donc également l'état de surface des éléments finis.

Ainsi, suivant la nature des revêtements, la stratégie de l'entreprise de démolition, les conditions de chantier, la nature des finitions du béton peut varier. Prendre en considération les effets du chantier permet d'affiner la stratégie de traitement de surface des matériaux à réemployer.

Concernant le traitement des surfaces après collecte et en vue du réemploi, la palette de finition est la même que celle applicable au béton sec : bouchardage, polissage, grenaillage, etc.

Voiles préfabriqués après décapage des revêtements intérieurs et désamiantage des surfaces, avant démolition ou déconstruction du bâtiment.

Récupération du matériau

La récupération de voiles en béton nécessite des moyens mécaniques lourds qui peuvent être ceux du chantier de démolition. La récupération est dépendante de plusieurs facteurs : contraintes de chantier, localisation des éléments dans le bâtiment et résultat recherché. Elle nécessite des études de dépose soigneuse complémentaires aux études classiques de démolition ; l'objectif étant de préserver l'intégrité des éléments pour pouvoir les réemployer. Certaines étapes doivent être anticipées, notamment si un sciage est prévu en amont de l'abattage du bâtiment, ou s'il faut poser des points d'ancrage pour permettre le levage des éléments à collecter, ou encore pour mettre à nu des aciers dit « de clavetage » afin de séparer des éléments préfabriqués et permettre leur levage.

Il s'agit dans tous les cas de mettre en place toutes les précautions nécessaires en lien avec le coordinateur de sécurité du chantier.

→ *Test de démontage* (ou avis expert). Il permet de s'assurer en pratique de la fiabilité technique et économique de la dépose envisagée. Étant donné le caractère expérimental de la démarche, il est judicieux de s'appuyer sur l'avis d'experts et d'entreprises de démolition et/ou de sciage du béton, ainsi que sur les retours d'expérience menée sur des typologies constructives semblables.

→ *Diagnostic*. La mission de diagnostic est généralement organisée en deux phases :

1. Recherche et analyse des documents existants apportant des renseignements sur l'ouvrage à démolir. Cette phase est complétée par une campagne de reconnaissances sur site.
2. Réalisation de sondage sur les éléments. Dans le cas de voiles porteurs, il est recommandé d'augmenter le nombre d'essais et de reconnaissances des matériaux pour augmenter la fiabilité des résultats.

Lorsque le gisement résulte de l'assemblage d'éléments préfabriqués, l'analyse des documents d'exécution facilite la localisation des zones de clavetage et autres liaisons.

L'objectif du diagnostic dans le cadre du réemploi de béton armé est d'avoir une image représentative de la structure et de son état. Pour cela, il convient de réaliser les reconnaissances suivantes :

- Contrôle visuel de l'épaisseur du mur en béton armé ;
- Contrôle visuel de l'état des armatures du béton armé et mesures de diamètres des fers ;
- Mesure de la profondeur de carbonatation. (i.e. la carbonatation est une réaction chimique provoquant le vieillissement naturel du béton) ;
- Mesure de l'enrobage des armatures du béton armé et des espacements. (i.e. l'enrobage correspond à l'épaisseur de béton entre une armature et la peau de la paroi. Elle permet d'assurer la protection contre la corrosion du ferraillage) ;
- Essai de résistance en compression du béton ;
- Essais de convenance de cohésion superficielle et/ou d'arrachement (i.e. la cohésion superficielle du béton est la pression qui permet aux molécules de tenir entre elles. Elle indique la résistance à l'arrachement de la couche superficielle du béton. Elle permet de mesurer l'adhérence des produits de réparation sur le béton).

Plusieurs critères aiguillent le choix et permettent de vérifier le potentiel d'un lot de voiles en béton pour le réemploi :

- *Ferraillage*. La densité et la répartition du ferraillage peut être évaluée à l'aide de la documentation existante, d'outil détecteur (type ferroscan) et de sondages. Il convient d'écarter les éléments présentant des éclats de béton occasionnés par l'oxydation des fers dans le béton.
- *Épaisseur*. Il est préférable qu'elle soit supérieure à 16 cm et que l'écart d'épaisseur entre les panneaux ne dépasse pas 1 cm.
- *Rectitude*. Pour des panneaux préfabriqués rectangulaires, l'écart entre bords parallèles est préférablement égal à maximum 1 cm ou 5 mm/mètre linéaire de distance entre les bords concernés.
- *Intégrité*. Les éléments ne doivent pas présenter de fissurations traversantes ou d'épaisseur supérieure à 1 mm. Ils doivent être exempts de réseaux de fissures généralisées pouvant présager d'une certaine faiblesse.
- *Etat*. Il convient de vérifier l'absence d'épaufrures provoquées par un choc accidentel sur le parement ou sur l'arête des éléments.
- *Accessibilité*. Il convient de tenir compte de l'emplacement des éléments à démonter dans le bâtiment.

→ *Dépose*. Les méthodologies de dépose sont variables suivant la nature, les quantités et la situation des éléments à récupérer, ainsi que selon le nouvel usage envisagé pour l'élément. L'important est de ne pas endommager les éléments et de limiter les mélanges. La méthode de dépose varie selon qu'il s'agisse de panneaux préfabriqués ou de voiles coulés sur place. Dans tous les cas, on cherchera à :

- optimiser le rapport entre les efforts supplémentaires à fournir et le résultat recherché.
- recréer les conditions de pose d'éléments préfabriqués : pose de points de levage (perçage ou pose d'anneaux).

Pour faciliter la dépose soigneuse des voiles, la méthode d'écrêtage, qui consiste à déconstruire le bâtiment depuis le niveau haut vers les niveaux bas, est la plus propice. Elle permet la mise en place d'engins et de personnes dans le bâtiment pour préparer l'accès aux éléments à collecter. Des engins de levage complémentaires interviennent pour le levage depuis le sol au droit de l'édifice.

Exemple de voile en béton après une dépose par grignotage © Alexis Leclercq

Ainsi, la méthode suivante pourra être envisagée :

1. Dépose du plancher haut tenant le mur en tête, afin de dégager une prise pour le mur.
2. Dépose de l'élément par grignotage en pied de mur ou par arrachement du mur en tête par basculement. Cette dernière méthode est toutefois à proscrire pour les voiles porteurs en béton armé. Cette pratique conduit en effet à la plastification (i.e. le dépassement de la limite élastique) des armatures verticales en pied de mur, rendant celles-ci impropres à un nouvel usage structurel.
3. Sciage. Avant la dépose, il est possible de scier les voiles, suivant une technique adaptée au produit final recherché et à la manutention. Le temps nécessaire au sciage doit être intégré au planning du chantier. Pour la dépose des voiles préfabriqués, une simple mise à nu des assemblages est parfois suffisante sans avoir besoin de recourir au sciage.
4. Couchage des voiles au niveau, à l'aide d'une mini-pelle.
5. Redimensionnement des éléments selon les dimensions finales souhaitées (facultatif. Cette opération peut être réalisée ultérieurement en atelier).
6. Collecte finale à l'abattage, par prélèvement à la pelle mécanique équipée d'un panier de tri (i.e. un panier de tri est une pince formée de deux mâchoires métalliques dont la surface de contact est une ligne droite, ce qui permet de répartir la pression exercée sur le matériau et limiter les chocs.
7. Mise en place d'éléments de levage (e.a. *Figure 1*) et élingage des éléments permettant d'assurer une manutention plus soigneuse.

A cette étape, il est indispensable que les éléments soient tracés et identifiables. Il convient de ne pas mélanger des éléments présentant des caractéristiques différentes en fonction :

- de l'orientation du voile lors du prélèvement (refend ou façade) ;
- de la constitution du ferraillage (section d'acier) ;
- de l'enrobage (possibilité de contrôler sur les contours des panneaux) ;
- de la profondeur de carbonatation (ce paramètre est susceptible d'évoluer pendant la durée du stockage).

→ *Opérations de transformation*. La préparation des éléments dépend du nouvel usage visé. Les opérations réalisées doivent notamment permettre de s'assurer de la solidité du composant et de sa durabilité.

- *Sciage*. Permet d'obtenir un voile rectangulaire à partir d'un élément brut et irrégulier. La rectitude des panneaux peut être rattrapée de façon à obtenir l'écart admissible souhaité.
- *Re-passivation des aciers*. La passivation consiste à rendre les aciers d'armatures passifs, à travers l'application d'une pellicule protectrice, dite de passivation. Cette pellicule permet de protéger les aciers de la corrosion. Elle est formée par l'action de la chaux libérée par les silicates de calcium sur l'oxyde de fer. Ponctuellement, il est possible de repassiver les acier si besoin. Cela nécessite le piquetage par burineur du béton adjacent, puis la passivation des aciers et la reconstitution de la couche d'enrobage. Si le besoin de repassivation est généralisé, il est préférable de mettre l'élément au rebut.
- *Réparations*. Du mortier de réparation pourra être appliqué pour combler d'éventuels éclats dus à la collecte ou au transport.
- *Préparation des chants* (pour un mur au fonctionnement de type mur maçonné). Dans le cas où le mode de résistance au cisaillement de l'élément met à contribution la jonction au mortier entre les chants du panneaux et leur support, il est possible de préparer les chants pour donner un aspect rugueux aux contours du voile afin d'augmenter l'adhérence. Cette opération peut être réalisée par burinage.
- *Traitement de la porosité.* Pour réduire les risques de dégradation du béton dans le temps, notamment dus aux cycles de gel/dégel, l'application de produit peut s'avérer nécessaire. Il s'agit de bouche pore ou minéralisant rendant le béton hydrofuge. Ces traitements peuvent être réalisées en atelier ou lors de la remise en œuvre.
- *Scellement d'armatures* (pour un mur au fonctionnement de type mur en béton armé). Le réemploi pour une utilisation dans un mur en béton armé peut nécessiter le scellement d'armatures sur le pourtour du voile. Cette possibilité doit être étudiée avec le fabricant du système de scellement en fonction de divers paramètres (épaisseur des voiles, résistance à la traction du béton, diamètre des armatures, etc.). Les chants peuvent être rendus rugueux par burinage du pourtour pour favoriser la résistance au cisaillement sur le plan considéré.
- *Traitement de surface*. Il existe une multitude de traitements de surface sur le béton : bouchardage, polissage, grenaillage, etc. Ces opérations peuvent être réalisées en atelier ou lors de la remise en œuvre.

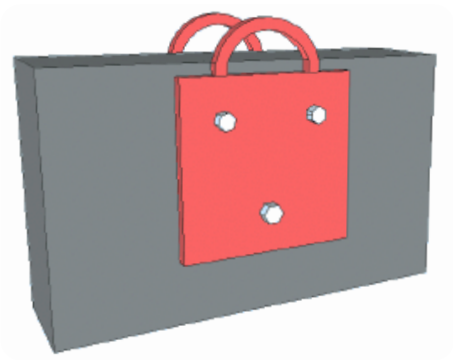


Figure 1. Exemple de système de levage

Sciage de voiles béton avant leur réemploi
© Alexis Leclercq

Sciage de voiles béton avant leur réemploi
© Alexis Leclercq

→ *Stockage*. Un stockage à l'abri des intempéries et sans contact avec le sol est recommandé. Les éléments doivent être protégés afin de ne pas subir un vieillissement prématuré.

Pour un stockage à plat, il est recommandé d'utiliser des chevrons intercalés entre chaque élément.

Pour un stockage sur chants, des équipements de type racks seront utilisés pour satisfaire les conditions énoncées ci-dessus.

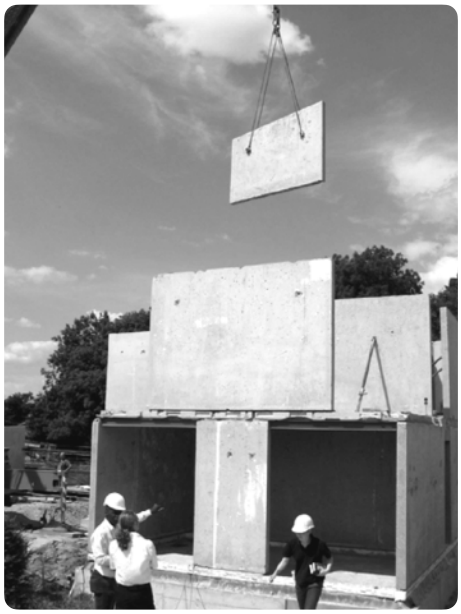
→ *Transport et livraison*. Les précautions nécessaires doivent être prises lors du transport et de la livraison en vue de minimiser les chutes et les chocs (palettes sanglées, etc.). Sauf en cas d'utilisation d'équipements adaptés, le transport devra se faire à plat. Pour un transport sur chant, il est possible d'utiliser des racks semblables à ceux utilisés par les fabricants de murs à coffrage intégré.

Les moyens de levage doivent être cohérents avec les éléments à manutentionner. Le levage peut être réalisé par des engins de type grue, pelle hydraulique ou chariot télescopique. Dans le cas d'utilisation d'engins pouvant se déplacer avec la charge, il conviendra de choisir au cas par cas le matériel en fonction du poids et de la géométrie, du terrain et de la hauteur de levage.

La manutention peut se faire par le biais d'organes de levage pouvant, par exemple, être liés au béton par l'intermédiaire de scellements chimiques ou de boulons expansibles. L'ancrage devra prendre en compte les effets dynamiques de la manutention.

Il est conseillé d'impliquer des professionnels spécialisés pour garantir le bon déroulement de ces opérations.

Transport des éléments en béton



Les « maisons plattenbau » Das Recyclete Haus. Réalisées au début des années 2000 à Mehrow (Berlin), ces maisons ont été construites à partir de dalles de béton préfabriquées issues de la déconstruction d'immeubles de logement collectif à Berlin-Est (« plattenbau »). Les dalles préfabriquées ont été déposées et réutilisées en dalle de plancher et voiles porteurs. © Bureau d'architecture Conclus.

Applications et mise en œuvre

Il convient de se référer au normes de conception adhoc (e.a. EN 1992), aux normes relatives aux produits neufs (e.a. EN 14992+A1, EN 13369, etc.) ainsi qu'aux normes de mise en oeuvre liées aux produits en béton.

Le réemploi des éléments en béton récupéré peut convenir aux applications suivantes :

A. Voiles non-porteurs

B. Voiles porteurs

B.1. Fonctionnement type « béton armé »

B.2. Fonctionnement type « mur maçonné »

Avant de détailler les spécificités de chaque type d'application, voici quelques principes généraux qui sont applicables aux différents cas de figure :

→ *Technique d'origine*. Les techniques de pose peuvent différer selon que les éléments récupérés proviennent d'un voile coulé en place ou d'un voile préfabriqués. Ceci influence notamment la présence éventuelle d'armatures et de ferraillage et de points de levage et d'assemblage.

→ *Niveau de sécurité*. Du point de vue de la solidité de la structure conçue, il convient de travailler avec un niveau de sécurité satisfaisant. Le travail préparatoire des matériaux doit être adapté selon l'état des éléments prélevés, le périmètre du diagnostic réalisé, les résultats obtenus lors des essais et leur homogénéité.

→ *Nouvel usage*. Dans le cas de locaux chauffés et habités, il convient d'étudier l'étanchéité à l'eau et à l'air de la paroi ainsi que son isolation acoustique.

→ *Sens de la pose.* Plusieurs possibilités sont à envisager selon les techniques de mise en œuvre choisie (*Figure 2*) :

- Pose droite : l'élément est remis en œuvre dans une disposition similaire à celle dans laquelle il a été prélevé.
- Pose sur chant : l'élément est basculé de 90° par rapport à sa position d'origine et est reposé sur chant scié.
- Pose dite « désorientée » (uniquement pour le fonctionnement de type « mur maçonné ») : l'élément est posé dans une direction différente de celle de sa situation d'origine.

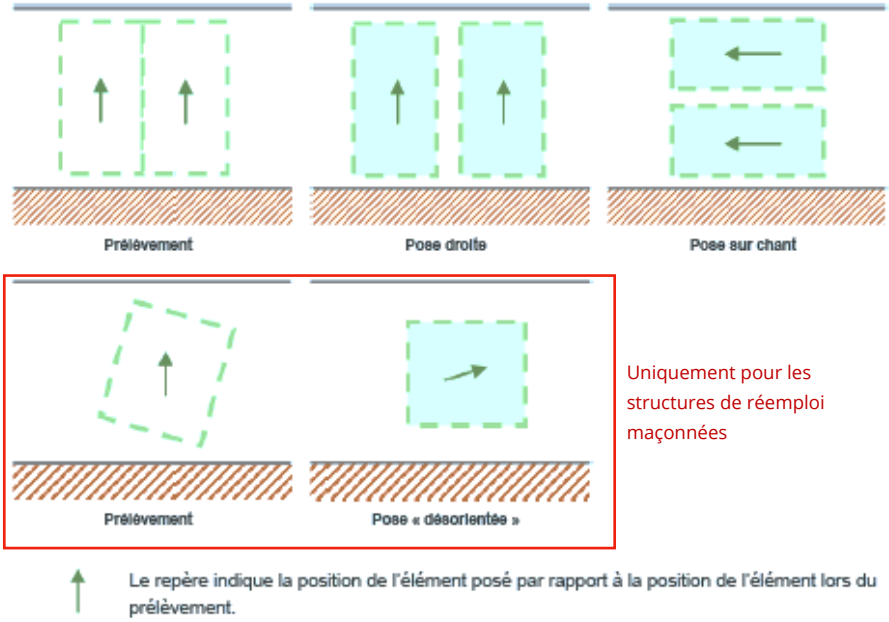


Figure 2. Schémas représentant les différentes solutions d'intégration des voiles en béton dans un ouvrage

Pour permettre la solidité du projet et sa durabilité, le prescripteur doit veiller à utiliser des lots présentant un certain degré d'homogénéité quant aux caractéristiques suivantes :

→ *Dimensions*. Les éléments collectés sont des panneaux rectangulaires d'une surface pouvant atteindre 2 × 3 m. L'épaisseur des panneaux doit être homogène afin de ne pas créer de désaffleur et être de minimum 16 cm. Il convient de respecter les limites admissibles de l'écart d'épaisseur entre les panneaux. Dans le cas de panneaux de réemploi, cette limite d'écart entre deux bords parallèles d'un panneau peut être égale à 1 cm, ou 0,5 cm/mètre linéaire de distances entre les bords considérés.

→ *Teinte*. Des variations de teinte et d'aspect sont possibles. Ces variations peuvent être dues au mode de production, à l'exposition d'origine, aux traitements précédemment appliqués, etc.

→ *Quantité*. Il est conseillé d'inclure un surplus lors de la fourniture, pour limiter les risques de manquer de matière dans le cas où certains panneaux se montreraient inaptes à la mise en œuvre sur le chantier.

A. Voiles non-porteurs

Dans ce cas de figure, les voiles de réemploi doivent uniquement être en capacité de reprendre leur poids propre. Ils jouent un rôle de remplissage et ne participent pas à la stabilité générale de l'ouvrage. Ceci implique que les voiles soient liaisonnés à l'ossature principale de l'édifice sans toutefois entrer en ligne de compte dans la raideur de sa structure.

Voici quelques principes pour la fixation des panneaux à l'ossature du bâtiment et entre eux.

- *Fixation directe entre les panneaux* (*Figure 3*). En pied, les panneaux peuvent être posés sur une surface plane et sèche et liaisonnées par des équerres ou sur un lit de mortier à retrait compensé. La fixation entre panneaux contigus doit empêcher les déplacements horizontaux (trous oblongs). Un joint vertical est ménagé entre les panneaux et bourré au mortier sans retrait. Il convient de bien reconstituer les couches d'enrobages. Il est conseillé de limiter la pose à 3 panneaux consécutifs au maximum, avec une longueur cumulée de panneaux non porteurs de 5 m au maximum entre éléments de l'ossature primaire.

- *Fixation par des profilés métalliques de bridage intercalés (Figure 4)*. Cette solution consiste à emboîter et boulonner des panneaux dans des profilés métalliques verticaux, à la manière des « parois berlinoises ». Les préconisations sont les mêmes que pour le système de fixation directe, à ceci près que :
  - le joint ménagé entre les panneaux et les profilés métalliques est un joint sec ;
  - la tranche non visible a préalablement fait l'objet d'un ragréage au mortier pour la reconstitution des couches d'enrobage ;
  - il faut ici prévoir des trous oblongs dans les éléments verticaux métalliques afin de libérer les déplacements horizontaux ;
  - la pose se limite à 2 panneaux consécutifs au maximum.
- *Traitement des angles et des about de murs (Figure 5)*. Pour les équerres et les fixations d'angles entre panneaux, des trous oblongs sont prévus sur les deux pans côté intérieurs. Les angles et les abouts peuvent être traités avec des profilés creux de section carrée sur lesquels des plats métalliques sont soudés sur les faces extérieures. Ce plat est boulonné aux panneaux et muni de trous oblongs. L'enrobage des tranches verticales des panneaux est préalablement reconstitué au mortier pour la protection des armatures visibles après sciage. En about de panneau, un profilé métallique carré ou rectangulaire et de largeur égale à l'épaisseur du panneau est disposé pour fixer le panneau. Des plats métalliques sont soudés au profilé et boulonnés à travers le panneau non porteur.

Ces techniques d'assemblage se prêtent tout particulièrement au cas d'une ossature en acier. Ces principes généraux peuvent également être adaptés aux ossatures en bois et en béton. L'important est de liaisonner les panneaux de réemploi de manière à ce qu'ils ne participent pas au contreventement du bâtiment.

B.1. Voiles porteurs de type « béton armé »

Dans cette approche, il convient d'assurer le caractère monolithique de la paroi. Le comportement de la nouvelle paroi sera alors comparable à celui d'une paroi en béton banché. Pour cela, il est nécessaire de liaisonner l'ensemble des éléments avant le clavetage.

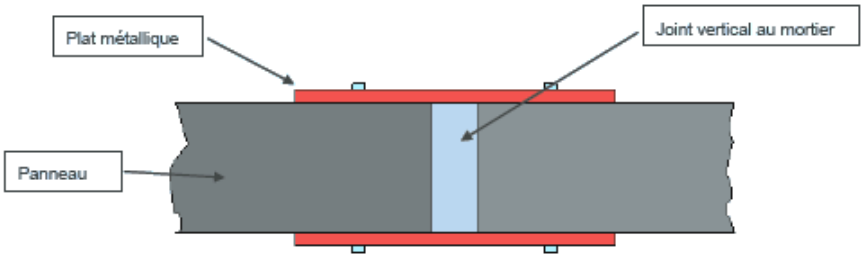


Figure 3. Solution de fixation directe entre panneaux

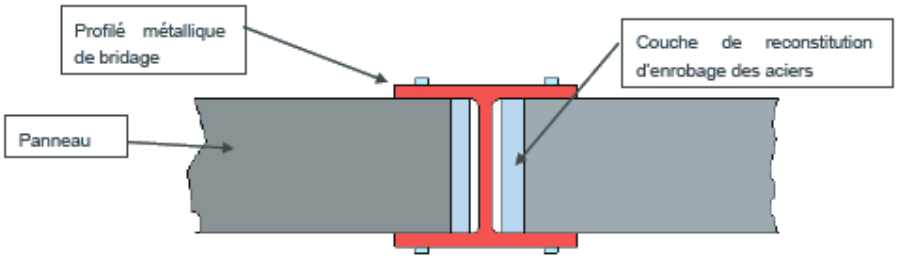


Figure 4. Solution de bridage par profilé métalliques

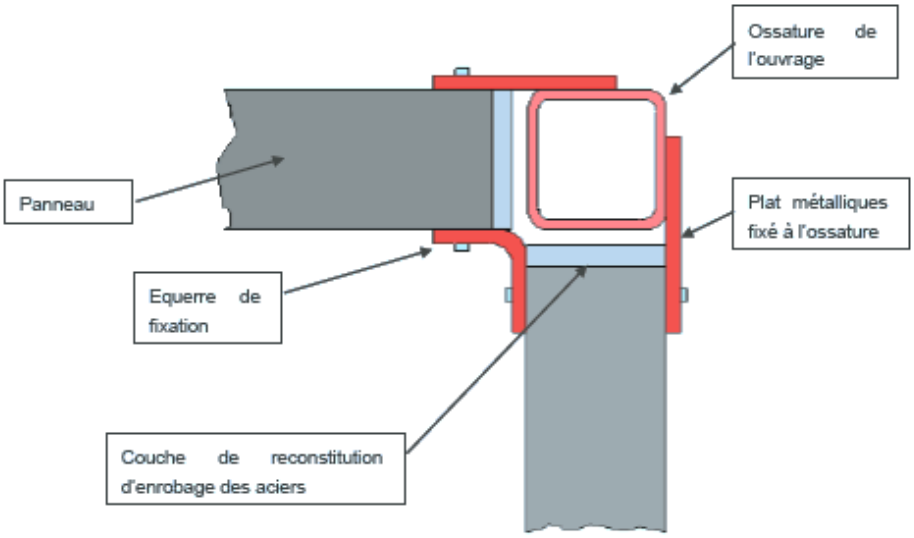


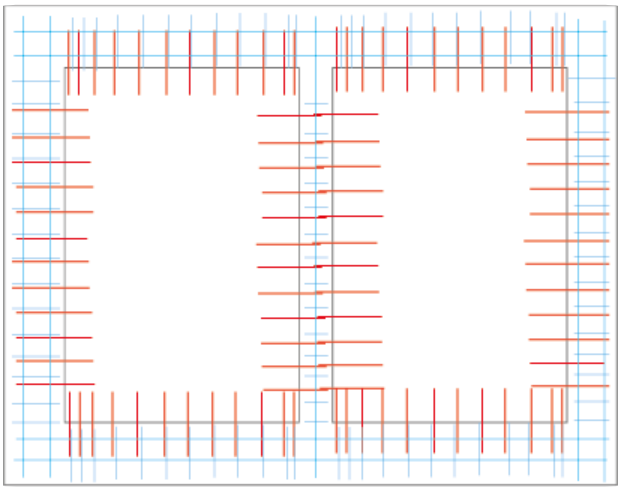
Figure 5. Traitement des angles

La densité d'armature dans les deux sens doit être connue et intégrée dans le dimensionnement de l'ouvrage. Des armatures de recouvrement sont scellées sur tout le pourtour des panneaux afin d'assurer le monolithisme de la paroi et le recouvrement des armatures du pourtour. Les calculs doivent se conformer à la norme EN 1992 (Eurocode 2).

Lorsque le mur participe au contreventement de la structure, les vérifications incluent l'ensemble des joints entre panneaux. L'utilisation de panneaux irréguliers peut rendre cette opération complexe. La *Figure 6* illustre une solution de fixation possible.

En partie courante des panneaux collectés, il convient de s'assurer que l'enrobage des armatures est satisfaisant, et cela même si les armatures n'entrent pas en considération dans la justification des performances de l'ouvrage.

Dans ce mode de conception, les contours des panneaux sont systématiquement enrobés et en contact direct avec le béton de clavetage. La reprise de bétonnage avec la surface glacée des panneaux restera un chemin privilégié pour la pénétration de l'eau, pour lequel il est nécessaire de prévoir une évacuation de l'eau excédentaire.



Légende :

(En blanc) : panneaux de réemploi

(En rouge) : armatures scellées sur le pourtour des panneaux qui permettent d'assurer une continuité de transmission des efforts entre le ferraillage des panneaux de réemploi et le ferraillage du pourtour mis en œuvre.

(En bleu) : ferraillage de recouvrement disposé sur le chantier, pour la réalisation d'un voile monolithique.

Figure 6. Exemple de mise en œuvre d'un mur en béton armé à partir de panneaux de béton de réemploi

B.2. Voiles porteurs de type « mur maçonné »

Dans cette approche, les voiles de réemploi constitutifs de la paroi sont confinés et ceinturés par des chaînages verticaux et horizontaux. La paroi est constituée d'un ou plusieurs panneaux mis en œuvre de façon à permettre le développement d'une bielle de compression afin d'assurer la résistance de la paroi aux efforts horizontaux. Dans la modélisation du comportement du béton armé, la bielle de compression est la zone de béton comprimé, généralement oblique par rapport aux directions principales de l'élément.

Des éléments non armés peuvent être utilisés pour ce type de mise en œuvre.

Les panneaux sont posés sur un lit de mortier et étayés avant la mise en œuvre de l'ensemble des chaînages. La rectitude des panneaux doit être vérifiée de façon à pouvoir travailler avec un lit de mortier d'épaisseur homogène.

Il est crucial que les panneaux adhèrent correctement à la couche de mortier des chaînages afin de garantir une bonne résistance aux contraintes de cisaillement de l'interface (qui peut être estimée à l'aide du §6.2.5 de la norme EN 1992 - Eurocode 2). Or, lorsqu'ils ont été sciés, les panneaux présentent justement des chants à l'aspect glacé, peu propices à l'adhérence. À partir de là, deux grandes approches sont possibles :

- *Maçonnerie chaînée à chants rugueux (Figure 7)*. Une fois sciés, les chants font l'objet d'un travail préparatoire spécifique, par exemple par burinage, afin de leur assurer une certaine rugosité (*voir § « Récupération du matériau »*). Dans ce cas, il est possible d'estimer la résistance initiale au cisaillement notée fvk0 à partir du tableau 3.4 du §3.6.2 de la norme EN 1996 - Eurocode 6.
- *Maçonnerie chaînée avec assemblage par plats métalliques (Figure 8)*. Dans le cas où l'adhérence entre les blocs n'est pas avérée ou sans essais de qualification préalable, des liaisons au moyen de plats métalliques peuvent alors être envisagées. Cette approche est particulièrement intéressante lorsqu'il convient de garantir une grande résistance au cisaillement (e.a. si la paroi participe au contreventement ou à la

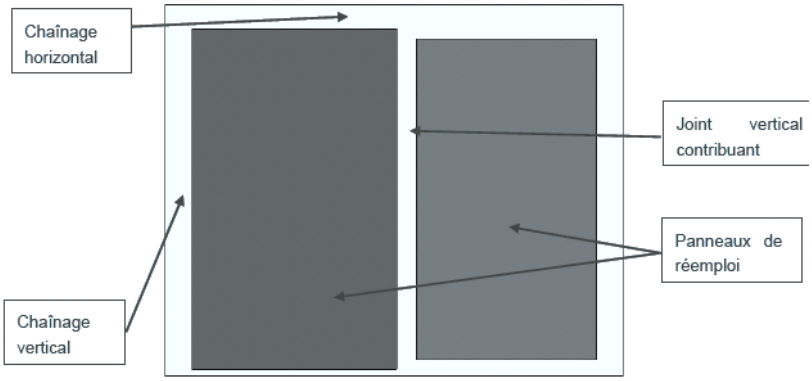


Figure 7. Solution de maçonnerie chaînée à chants rugueux

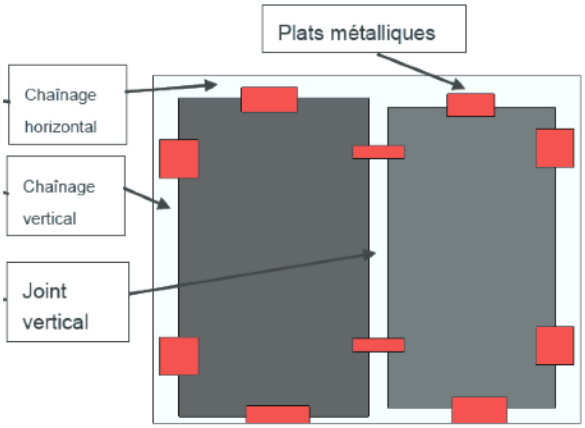


Figure 8. Solution de maçonnerie chaînée avec assemblage par plats métallique

Caractéristiques et aptitudes à l'usage

Les exigences relatives aux caractéristiques physiques et mécaniques sont directement liées à la tenue mécanique et à la durabilité dans le temps des voiles de réemploi.

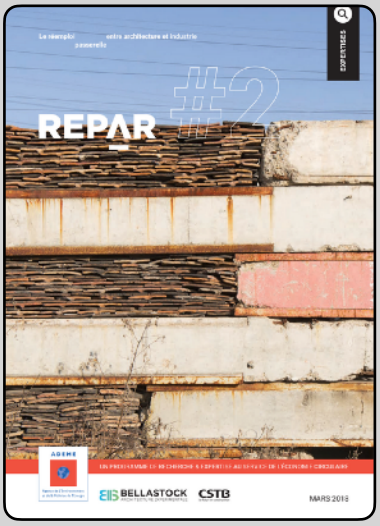
Caractéristiques	Porteur	Non porteur	Commentaires
Dimensions (longueur, largeur), régularité de la forme	x	x	Ces caractéristiques sont liées à la découpe.
Exigences géométriques	x	x	• Longueur : 30 cm < L < 200 cm • Largeur : 30 cm < h < 50 cm • Ep : 16 < e < 40 cm avec une variation entre éléments de 6mm max • Rectitude • Parallélisme des bords opposés
Exigence mécaniques	x		2400 kg/m³ < ρ < 2500 kg/m³
Qualité de la surface	x	x	Les voiles présentant des ouvertures de fissures > 1 mm, des fissures traversantes, ou un réseau de fissures sont mises au rebut.
Conception et solidité	x	x	Le mur doit être capable de reprendre son poids propre et les chargements en tête de mur. -> *Voiles porteurs* : • Il est possible d'estimer la résistance initiale au cisaillement notée fvk0 à partir du tableau 3.4 du §3.6.2 de la norme EN 1996 - Eurocode 6 ; • La longueur entre deux appuis sera au plus égale à la moitié de la longueur basse du voile ; • Les faces glacées par le sciage et laissant apparaître des armatures pourront être posées du côté visible à condition de prévoir un traitement des ferrailles apparentes ; -> *Voiles non porteurs* : l'ouvrage dans lequel est intégré le voile non porteur ne pourra pas considérer celui-ci pour justifier sa stabilité. Il faudra prévoir un jeu entre le panneau et l'ossature, afin de désolidariser celui de l'ossature, pour qu'il ne participe pas à sa raideur. De plus, l'intégration dans l'ouvrage devra permettre de justifier de la stabilité de l'élément réemployé, notamment entre éléments collectés et ossature primaire.
Durabilité	x	x	• Si la profondeur de carbonatation dépasse la valeur de l'enrobage divisée par 2 alors une réparation au mortier est nécessaire. • Si la corrosion s'est déjà manifestée, la purge du béton adjacent suivi de la passivation des aciers avant reconstitution de la couche d'enrobage est nécessaire. Ce procédé n'est pas envisageable à grande échelle. • En partie courante, il convient de s'assurer que l'enrobage des armatures est suffisant. • Les contours des panneaux et jointure de panneaux doivent être enrobés de mortier (pose joint creux afin de les rendre invisibles)
Étanchéité à l'eau	x	x	Les critères d'étanchéité sont similaires à ceux d'un mur en béton plein. Une attention particulière est à porter sur le traitement de l'étanchéité des liaisons.

Caractéristiques	Porteur	Non porteur	Commentaires
Comportement en situation d'incendie	x	x	• Incombustible • Les critères de résistance (R), d'étanchéité (E) et d'isolation (I) sont ceux d'un mur en béton armé. Ces vérifications relèvent de la norme EN 1992-1-2 - Eurocode 2. • La résistance peut être augmentée ou justifiée par l'application d'une couche de finition de type plaque de plâtre.
Affaiblissement acoustique	x	x	• Proche de celui d'un mur béton courant avec joint plein. • Même soumission réglementaire et justification par évaluation acoustique du système.

Projet Super Local. Ce projet expérimental réalisé en 2017 aux Pays-Bas a mis en place un procédé de réemploi de modules tridimensionnels de béton extraits d'un ancien bâtiment de logements, pour la construction de maisons individuelles. Les modules sont composés de dalles et de murs, ils ont été sciés avant d'être extraits à la grue et transportés par camion sur le chantier de réemploi à proximité. Client : HEEMWonen. Architecte : SeC Architects. Entreprise : Jongen Construction. Unité de recherche : Zuyd University of Applied Sciences, Research group SURD.

Le pavillon de la Fabrique du Clos à Stains. Lors de la démolition d'un ensemble de logements à Stains, une partie des éléments en béton ont été réemployés sur le site. Les voiles de béton extraits ont été sciés sur place et remis en œuvre comme murs non porteurs d'un local à vélos. Le pavage des sols des espaces extérieurs a également été réalisé à partir de blocs de béton brut. Pouvoir adjudicateur : Seine-Saint-Denis Habitat. Conception : Bellastock. Stains (France), 2017 © Alexis Leclercq

En savoir plus !



Selon l'étude REPAR#2 menée en France sur un cas concret et spécifique de réemploi de voile en béton sur site pour la construction d'un petit pavillon, la comparaison entre un procédé de réemploi et deux procédés neufs a permis de tirer les conclusions suivantes au niveau économique :

→ le coût de la solution constructive basée sur le réemploi est environ 7% plus élevé qu'une solution constructive basée sur l'évacuation des anciens matériaux et la mise en oeuvre de briques pleines neuves, et près de deux fois supérieur s'il s'agit de parpaings pleins neufs.

Ces résultats sont principalement liés aux nombreuses opérations de transformation des matériaux de réemploi. Les coûts élevés expriment la démarche expérimentale et pourraient fortement diminuer dans une logique de réplicabilité à plus grande échelle. Plusieurs axes d'amélioration du processus de réemploi ont d'ailleurs été identifiés :

- *Optimisation du procédé de collecte de la matière, de manière à limiter les pertes lors de la dépose des éléments d'une part et d'éviter des coûts de pré-sciage des voiles d'autre part ;*
- *Diminution des coûts liés à la conception ;*
- *Diminution du temps passé lié à l'utilisation de moyens techniques spécifiques à l'expérimentation (grue hydraulique en phase de reconstruction) ;*
- *Diminution des coûts fixes liés à la passivation des fers mis à nu, par l'emploi d'un mortier en cas de non carbonatation des aciers.*

En tenant compte de ces éléments dans un scénario optimisé, une diminution de 30% du coût de l'ouvrage en réemploi est possible.

Lien : https://www.bellastock.com/projets/repar-2/

Selon les sources, réutiliser 100 m² d'éléments en béton pour la conception de voiles en béton de réemploi permet de prévenir la production de ~2030 à ~3770 kg de CO_2 eq. liés à la fabrication d'éléments neufs (phase de production uniquement). Selon les sources, cela correspond à un trajet de ~12 200 à ~22 600 km effectué dans une petite voiture diesel.

Disponibilité

Les voiles en béton ne sont pas un produit couramment disponible sur le marché du réemploi. Il est toutefois possible d'entreprendre une démarche de réemploi spécifique, dans le contexte d'un projet donné et à l'initiative des commanditaires et des concepteurs. Pour cette raison, l'approvisionnement de voiles en béton se fait directement à partir d'une opération de démolition.

Prix indicatifs (Hors Taxes)

L'absence de filière établie ne permet pas de définir des prix de voiles de réemploi avec précision. De manière générale, le prix d'un voile sera dépendant de facteurs inhérents au chantier source (nombre d'éléments à collecter, complexité du démontage, application prévue, etc.) et au contexte de remise en œuvre.

Substances dangereuses et précautions

Au stade de l'investigation documentaire, certaines restrictions d'usage pourront être émises, notamment dans les cas suivants :

→ Béton ayant été soumis à une attaque chimique par les sols et les eaux souterraines naturelles (correspondant aux trois classes d'exposition XA1, XA2 et XA3 de la norme EN 206).

→ Présence éventuelle d'amiante sur la surface du voile béton (isolant coupe-feu en façade, joint, colle de revêtement intérieur, etc.). Le désamiantage préalable du bâtiment peut permettre de nettoyer les éléments en béton des résidus d'amiante, un élément béton ayant été en contact avec de l'amiante ne doit pas automatiquement être disqualifié pour le réemploi au stade du diagnostic.

Embodied carbon (Cradle to gate - production A1-A3)	kg CO_2 eq./m²	kg CO_2 eq./kg
Base de donnée INIES (FR) - Déclaration collective - SNBPE & Armatures - Béton (hors armatures) pour poteau extérieur, C2530 XC4XF1 CEM IIA (v.1.1) *	20,3	0,06
Base de donnée INIES (FR) - Déclaration collective - SNBPE - Mur en béton extérieur d'épaisseur 0.16 m, C25/30 XC4 / XF1 CEM II/A (v.1.5) **	32,4	0,08
Base de donnée INIES (FR) - Déclaration collective - SNBPE - Mur en béton intérieur d'épaisseur 0.20 m, C25/30 XC1 CEM II/A (v.1.7) **	37,7	0,08

** Valeur indicative pour voile en béton avec une densité d'acier de 18,5kg/m³. Distance de transport du matériau moyenne : 18km*

*** Valeur indicative pour voile en béton avec une densité d'acier de 50kg/m³. Distance de transport du matériau moyenne : 18 km. NB : les étapes de production (A1-A3) de l'acier ont été ajoutées, lorsque celles-ci n'étaient pas prises en compte dans la fiche.*