

Dimensionnement des murs en maçonnerie



D'après l'Eurocode 6

- > Dimensionnement vis-à-vis des actions agissant dans le plan des murs et des actions normales au plan des murs

Guide Eurocode

D'après la norme NF EN 1996-1-1: 2006
(Eurocode 6, partie 1-1)



DIMENSIONNEMENT DES MURS EN MAÇONNERIE

**Dimensionnement vis-à-vis des actions agissant
dans le plan des murs et des actions normales
au plan des murs**

Directeur de collection : Ménad CHENAF (CSTB)

Auteurs :

Victor DAVIDOVICI

(DYNAMIQUE CONCEPT)

Luc DAVENNE (NECS)

Shahrokh GHAVAMIAN (NECS)

Établissement public au service de l'innovation dans le bâtiment, le CSTB, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment exerce quatre activités clés : la recherche, l'expertise, l'évaluation, et la diffusion des connaissances, organisées pour répondre aux enjeux de développement durable dans le monde de la construction. Son champ de compétences couvre les produits de construction, les bâtiments et leur intégration dans les quartiers et les villes.

Avec ses 909 collaborateurs, ses filiales et ses réseaux de partenaires nationaux, européens et internationaux, le CSTB est au service de l'ensemble des parties prenantes de la construction pour faire progresser la qualité et la sécurité des bâtiments.

Avertissement

Le présent guide ne se substitue en aucun cas aux textes de références qu'ils soient réglementaires, normatifs ou codificatifs.

Le CSTB décline toute responsabilité quant aux conséquences directes ou indirectes de toute nature qui pourraient résulter de toute interprétation erronée du contenu du présent guide.

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur ou du Centre Français d'Exploitation du droit de copie (3, rue Hautefeuille, 75006 Paris), est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (Loi du 1^{er} juillet 1992 - art. L 122-4 et L 122-5 et Code Pénal art. 425).

© CSTB septembre 2012

ISBN 978-2-86891-498-9

AVANT-PROPOS

Les autorités publiques ont confié au CSTB l'organisation et la gestion d'un programme d'accompagnement de la mise en œuvre de la directive « produits de construction » (Directive 89/106 du 21 décembre 1988). Ce programme d'accompagnement, appelé « Plan Europe » comporte plusieurs volets, tous concourant à l'intégration des textes techniques européens du domaine de la construction dans les usages français.

Le Plan Europe a été dirigé et organisé par le CSTB, en partenariat avec les acteurs du bâtiment, partenariat formalisé par une convention en date du 1^{er} juin 2004. Les partenaires concernés sont :

- le ministère de l'Équipement, des Transports, de l'Aménagement du Territoire, du Tourisme et de la Mer ;
- le Secrétariat d'État au Logement ;
- la Fédération Française du Bâtiment (FFB) ;
- la Confédération de l'Artisanat et des Petites Entreprises du Bâtiment (CAPEB) ;
- l'Union Sociale pour l'Habitat (USH) ;
- la Fédération française des Promoteurs Constructeurs de France (FPC France) ;
- le Comité professionnel de la Prévention et du Contrôle technique dans la Construction (COPREC) ;
- l'Union Nationale des Syndicats Français d'Architectes (UNSFA) ;
- la Fédération des Professionnels de l'Ingénierie (SYNTEC-Ingénierie) ;
- la Chambre de l'Ingénierie et du Conseil de France (CICF) ;
- l'Association Française de Normalisation (AFNOR) ;
- le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB).

L'un des volets du Plan Europe est dédié spécifiquement aux Eurocodes. Il vise à procurer aux acteurs de la construction, pour les ouvrages courants, des outils pratiques consistant en des guides d'analyse commentés et des programmes de calcul leur permettant d'appliquer les principes et méthodes de dimensionnement proposés dans ces normes. Sont abordés à ce titre tous les matériaux habituels de structure : acier, béton, bois et maçonnerie vis-à-vis des actions normales, climatiques (vent, neige) ou accidentelles (feu, séisme).

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION 3

2. RÉSUMÉ DE L'EUROCODE 6..... 5

2.1. Norme NF EN 1996-1-1 : règles générales..... 5

2.2. Norme NF EN 1996-2 : choix des matériaux et mise en œuvre 33

2.3. Norme NF EN 1996-3 : méthodes simplifiées maçonneries non armées 35

3. MÉTHODES RETENUES POUR LA CONCEPTION DES TABLEAUX 43

3.1. Hypothèses et champ d'application du guide 43

3.2. Murs chargés verticalement 47

3.3. Murs de contreventement..... 54

3.4. Murs de soubassement soumis à la poussée des terres 59

4. UTILISATION DES TABLEAUX 63

4.1. Hypothèses..... 63

4.2. Règles pour la détermination des conditions aux limites des murs..... 63

4.3. Notice d'utilisation des tableaux..... 66

5. RÉFÉRENCES 71

ANNEXES..... 77

1. INTRODUCTION

L'Eurocode 6 concerne le calcul des ouvrages en maçonnerie et comprend les parties suivantes :

- la norme **NF EN 1996-1-1** [①] : règles générales pour ouvrages en maçonnerie armée et non armée ;
- la norme **NF EN 1996-1-2** [②] : règles générales – comportement au feu ;
- la norme **NF EN 1996-2** [③] : conception, choix des matériaux et mise en œuvre des maçonneries ;
- la norme **NF EN 1996-3** [④] : méthodes de calcul simplifiées pour ouvrages en maçonnerie non armée.

À celles-ci s'ajoutent les Annexes Nationales destinées à définir les conditions d'application sur le territoire français des normes européennes.

Les champs d'application de l'Eurocode 6 sont plus vastes que ceux du **DTU 20.1** [⑤], il comporte donc plus d'articles.

D'autre part, les textes européens sont le fruit d'un consensus entre différents pays. Ils sont donc volontairement imprécis sur certains points. De nombreux choix restent à faire pour avoir des références contractuelles valables.

Les Annexes Nationales font certains choix essentiels, mais il reste encore des choix à faire et certaines clauses ambiguës à interpréter.

Face à cela, les acteurs de la construction en maçonnerie sont un peu déconcertés et ils souhaitent un texte non ambigu, simple, sécuritaire et qui ne pénalise pas l'économie du projet.

L'objectif de ce document d'application est de faciliter et de guider dans ces choix, en particulier pour les petits ouvrages courants : maisons individuelles et petits collectifs.

Dans le processus complet de dimensionnement d'un ouvrage, ce guide ne concerne que le dimensionnement individuel des panneaux de murs. Il est considéré que l'utilisateur a déjà déterminé les sollicitations verticales (descente de charge) et les sollicitations horizontales (action du vent) par la méthode de son choix.

2. RÉSUMÉ DE L'EUROCODE 6

On donne ci-après un résumé de l'Eurocode 6 avec les commentaires associés, nécessaires à la définition des hypothèses et du domaine d'application des méthodes simplifiées. Chaque fois que les règles générales de l'Eurocode ont une correspondance dans l'Annexe Nationale qui précise l'application pour la France, on ne présentera que la partie applicable en France.

2.1. Norme NF EN 1996-1-1 : règles générales

La partie 1-1 de l'Eurocode 6 est la plus volumineuse. Elle décrit les règles générales applicables à la plupart des situations, pour des maçonneries armées et non armées. Les techniques de calcul exposées sont assez complexes, car elles envisagent beaucoup de situations, non nécessairement utiles pour les ouvrages courants.

Sans entrer dans le détail, on ne présente ici que les idées principales utiles pour comprendre la philosophie du dimensionnement des murs en maçonnerie.

2.1.1. Généralités

Cette section précise le domaine d'application, les normes de référence, les termes et définitions, les symboles utilisés :

- l'Eurocode 6 ne traite que ce qui concerne les prescriptions de résistance, de service (aptitude à l'emploi) et de durabilité des ouvrages. Les autres prescriptions, par exemple celles relatives aux isolations thermiques ou acoustiques, ne sont pas abordées (cf. clause 1.1.1 (2)P de la norme **NF EN 1996-1-1**) ;
- l'exécution des travaux n'est traitée que dans la mesure nécessaire à la définition des qualités de matériaux de construction et de produits qu'il convient de mettre en œuvre, et à la définition de la qualité d'exécution sur chantier requis conformément aux hypothèses des règles de calcul (cf. clause 1.1.1 (3)P de la norme **NF EN 1996-1-1**) ;
- l'Eurocode 6 ne traite pas des prescriptions particulières du calcul au séisme. Les dispositions à prendre vis-à-vis de telles prescriptions sont données par l'Eurocode 8, qui est cohérent avec l'Eurocode 6 et le complète (cf. clause 1.1.1 (4)P de la norme **NF EN 1996-1-1**) ;
- les valeurs numériques des actions devant être prises en compte dans le calcul des bâtiments et des ouvrages de génie civil ne sont pas données par l'Eurocode 6. Ces valeurs figurent dans l'Eurocode 1 (cf. clause 1.1.1 (5)P de la norme **NF EN 1996-1-1**).

Les domaines non traités par la norme **NF EN 1996-1-1** sont les suivants (cf. clause 1.1.2 (5P)) :

- voûtes, coupoles, ponts, barrages, cheminées, réservoirs, effets dynamiques sur bâtiments élevés ;
- maçonneries avec mortiers de plâtre avec ou sans ciment ;
- maçonnerie non régulière (moellons bruts).

L'article 1.5 de la norme **NF EN 1996-1-1** donne les termes et définitions utilisés en maçonnerie. Les termes sont classés par catégories :

- termes relatifs à la maçonnerie (cf. article 1.5.2) ;
- termes relatifs à la résistance de la maçonnerie (cf. article 1.5.3) ;
- termes relatifs aux éléments de maçonnerie (cf. article 1.5.4) ;
- termes relatifs au mortier (cf. article 1.5.5) ;
- termes relatifs au béton de remplissage (cf. article 1.5.6) ;
- termes relatifs aux armatures (cf. article 1.5.7) ;
- termes relatifs aux composants et accessoires (cf. article 1.5.8) ;
- termes relatifs aux joints de mortier (cf. article 1.5.9) ;
- termes relatifs aux types de mur (cf. article 1.5.10) ;
- autres termes (cf. article 1.5.11).

On ne rappelle ici que les termes principaux utiles dans ce guide. Pour la liste exhaustive, se reporter à l'article 1.5 de la norme **NF EN 1996-1-1**.

■ Définitions relatives aux types de maçonnerie et de mur

Maçonnerie (cf. article 1.5.2.1) : assemblage d'éléments de maçonnerie posés selon un appareillage spécifié et hourdés ensemble à l'aide d'un mortier.

Maçonnerie non armée (cf. article 1.5.2.2) : maçonnerie ne présentant pas une armature suffisante pour être considérée comme un ouvrage en maçonnerie armée.

Maçonnerie armée (cf. article 1.5.2.3) : maçonnerie dans laquelle des barres ou treillis sont enrobés dans du mortier ou du béton de façon telle que tous les matériaux agissent ensemble pour résister aux forces appliquées.

Maçonnerie confinée (chaînée), (cf. article 1.5.2.5) : maçonnerie intégrant des éléments de confinement en béton armé (ou de maçonnerie) armée dans les directions verticale et horizontale.

Mur porteur (cf. article 1.5.10.1) : mur principalement calculé pour supporter une charge imposée en plus de son poids propre.

Mur creux (cavity wall), (cf. article 1.5.10.3) : mur comprenant deux parois simples parallèles, efficacement reliées par des attaches ou des armatures pour joints d'assise. L'espace entre les deux parois est laissé vide ou est rempli complètement ou partiellement par un isolant thermique non porteur.

Note

Un mur comprenant deux parois séparées par un vide, dont l'une des parois est un mur d'habillage ne contribuant pas à la résistance ou à la raideur de l'autre paroi (généralement porteuse), doit être considéré comme un mur constitué de deux murs (mur porteur simple plus mur d'habillage).

Mur à joints interrompus (shell bedded wall), (cf. article 1.5.10.7) : mur dont les éléments de maçonnerie sont hourdés en deux bandes de mortier disposées le long des bords.

Mur de contreventement (cf. article 1.5.10.9) : mur destiné à résister à des forces latérales dans son plan.

Mur raidisseur (cf. article 1.5.10.10) : mur établi perpendiculairement à un autre mur pour lui fournir un appui contre les forces latérales ou pour résister au flambement et aussi contribuer à la stabilité de la construction.

■ Définitions relatives aux composants et au montage de la maçonnerie

Appareillage (cf. article 1.5.2.6) : disposition des éléments de maçonnerie selon un aspect régulier pour obtenir un fonctionnement monolithique.

Élément de maçonnerie (cf. article 1.5.4.1) : élément préformé en vue de l'utilisation dans les ouvrages en maçonnerie.

Section brute d'un élément de maçonnerie (cf. article 1.5.4.9) : aire de la section transversale d'un élément, sans déduction de l'aire des alvéoles, évidements ou retraits.

Mortier de montage (cf. article 1.5.5.1) : mélange composé d'un ou de plusieurs liants minéraux, de granulats, d'eau et parfois d'additions et/ou d'adjuvants, et destiné au hourdage, au jointoiement et au rejointoiement d'éléments en maçonnerie.

Mortier de joints minces (cf. article 1.5.5.3) : mortier performant dont la dimension maximale des granulats est inférieure ou égale à une valeur spécifiée (épaisseur du joint entre 0,5 et 3 mm).

Mortier performanciel (formulé), (cf. article 1.5.5.5) : mortier dont la composition et la méthode de fabrication ont été choisies en vue d'obtenir des propriétés spécifiques (concept de performance).

Mortier de chantier (cf. article 1.5.5.11) : mortier composé de constituants individuels dosés et mélangés sur chantier.

Joint d'assise (cf. article 1.5.9.1) : couche de mortier entre les faces de pose d'éléments de maçonnerie.

Joint vertical (joint de bout), (cf. article 1.5.9) : joint de mortier perpendiculaire au joint d'assise et à la face de parement du mur.

Coupure de capillarité (cf. article 1.5.8.1) : couche en matériau étanche, en éléments de maçonnerie ou autre matériau, utilisée dans la maçonnerie pour s'opposer au passage de l'eau.

Attache pour mur (cf. article 1.5.8.2) : dispositif destiné à relier une paroi d'un mur creux à travers un vide à l'autre paroi ou à une ossature ou à un mur support.

Feuillard d'ancrage (cf. article 1.5.8.3) : dispositif destiné à relier un ouvrage en maçonnerie à un autre ouvrage adjacent, tel que plancher ou toiture.

Saignée (cf. article 1.5.11.1) : rainure créée dans la maçonnerie.

Réservation (cf. article 1.5.11.2) : renforcement ménagé au montage dans le parement d'un mur.

Joint de fractionnement (cf. article 1.5.11.4) : joint permettant un libre mouvement dans le plan du mur.

■ Définitions relatives aux résistances

Résistance à la compression des éléments de maçonnerie (cf. article 1.5.4.10) : résistance moyenne à la compression d'un nombre spécifié d'éléments de maçonnerie (cf. normes **NF EN 771-1** à **NF EN 771-6** [6]).

Résistance à la compression normalisée des éléments de maçonnerie (cf. article 1.5.4.11) : résistance à la compression d'éléments de maçonnerie rapportée à la résistance à la compression d'un élément de maçonnerie équivalent de 100 mm de large par 100 mm de haut (cf. normes **NF EN 771-1** à **NF EN 771-6**).

Résistance à la compression du mortier (cf. article 1.5.5.12) : résistance moyenne à la compression d'un nombre spécifié d'éprouvettes de mortier après conservation pendant vingt-huit jours.

Résistance caractéristique de la maçonnerie (cf. article 1.5.3.1) : valeur de la résistance de la maçonnerie dont la probabilité de ne pas être atteinte est de 5 % dans une série d'essais supposés (par hypothèse) illimités. Cette valeur correspond en règle générale à un fractile spécifié de la distribution statistique supposée de la propriété particulière du matériau ou du produit. Dans certains cas, une valeur nominale est considérée comme une valeur caractéristique.

Résistance à la compression de la maçonnerie (cf. article 1.5.3.2) : résistance de la maçonnerie en compression sans prise en compte des effets de frettage des plateaux de presse, ni de l'élancement ou de l'excentricité des charges.

Résistance au cisaillement de la maçonnerie (cf. article 1.5.3.3) : résistance de la maçonnerie soumise à des efforts de cisaillement.

Résistance à la flexion de la maçonnerie (cf. article 1.5.3.4) : résistance de la maçonnerie en flexion.

2.1.2. Base du calcul

Cette section rappelle les prescriptions de base, les principes de calcul des états limites, les variables de base et la vérification par la méthode des coefficients partiels. Elle précise les valeurs de calcul des actions, les combinaisons d'actions à prendre en compte et les valeurs de calcul des caractéristiques des matériaux :

- il y a lieu de produire un calcul aux états limites conjointement à la méthode des coefficients partiels décrite dans la norme **NF EN 1990 [7]** ;
- les actions sont celles figurant dans les parties appropriées de la série des normes **NF EN 1991 [8]** ;
- les combinaisons d'action et les coefficients partiels de charge sont donnés dans la norme **NF EN 1990**. Deux notes (cf. article 2.4.2 de la norme **NF EN 1996-1-1**) rappellent que dans le cas d'immeubles d'habitation et de bureaux, il est généralement possible de simplifier les combinaisons de charge indiquées dans la norme **NF EN 1990**.

Dans ce guide, on ne présente que le dimensionnement des murs, supposant que les sollicitations sont déjà calculées en tenant compte des actions et coefficients pertinents.

Au sens de l'Eurocode 8, on peut généralement considérer les maisons individuelles et les petits collectifs (voir aussi paragraphe 3.1) comme des bâtiments réguliers. À ce titre il est possible d'utiliser, pour la détermination de sollicitations, la méthode d'analyse par forces latérales.

Les valeurs du coefficient partiel γ_M aux ELU (états limites ultimes) sont données dans la clause 2.4.3 (1)P de l'Annexe Nationale de la norme **NF EN 1996-1-1** pour les différents matériaux en fonction du niveau de contrôle (Inspection Level). Les niveaux de contrôle sont explicités dans cette même clause :

- IL3 : contrôle qualité permanent attesté par une tierce partie ;
- IL2 : contrôle qualité non permanent et assuré par le maître d'ouvrage ;
- IL1 : contrôle interne seul.

Dans ce guide, pour la méthode simplifiée, on a choisi le niveau de contrôle le plus faible IL1 (cf. paragraphe 3.1.3 de ce guide).

Pour les ELS (états limites de service), le coefficient partiel est : $\gamma_M = 1$ (cf. clause 2.4.3 (1)P de l'Annexe Nationale de la norme **NF EN 1996-1-1**).

2.1.3. Matériaux

Cette section décrit d'abord les matériaux individuellement : éléments de maçonnerie (ou blocs), mortier et autres matériaux (acier, béton). Elle détermine ensuite les caractéristiques mécaniques de la maçonnerie : résistance en compression, au cisaillement et en flexion.

On précise au paragraphe 3.1.1 les matériaux retenus dans ce guide.

2.1.3.1. Éléments de maçonnerie

Les éléments de maçonnerie concernés par l'Eurocode 6 doivent faire partie de l'un des six types suivants (cf. article 3.1 de la norme **NF EN 1996-1-1**) :

- briques de terre cuite (cf. norme **NF EN 771-1**) ;
- éléments de maçonnerie en silico-calcaire (cf. norme **NF EN 771-2**) ;
- éléments de maçonnerie en béton de granulats (cf. norme **NF EN 771-3**) ;
- éléments de maçonnerie en béton cellulaire autoclavé (cf. norme **NF EN 771-4**) ;
- éléments de maçonnerie en pierre reconstituée (cf. norme **NF EN 771-5**) ;
- éléments de maçonnerie en pierre naturelle (cf. norme **NF EN 771-6**).

Ils sont classés en deux catégories (I et II) définies dans la série des normes **NF EN 771**.

Les éléments de maçonnerie sont classés en quatre groupes selon des prescriptions géométriques (cf. article 3.1.1 et tableau 3.1 de la norme **NF EN 1996-1-1**) :

- volume des alvéoles ;
- orientation des alvéoles ;
- épaisseurs des parois ;
- type de matériau.

La résistance à la compression moyenne normalisée f_b (cf. article 3.1.2 de la norme **NF EN 1996-1-1**) est soit déclarée par le fabricant, soit obtenue à partir de la résistance à la compression en utilisant l'annexe A de la norme **NF EN 772-1** [9].

2.1.3.2. Mortiers

Il y a trois façons de classer les mortiers de montage (cf. norme **NF EN 998** [10]) :

- selon les constituants : usage courant, joints minces ou allégés ;
- selon la définition de la composition : performanciel ou de recette ;
- selon le mode de fabrication : industriel (dosé et mélangé en usine), semi-fini (prédosé), de chantier (dosé et mélangé sur chantier).

Les mortiers de joints minces ou les mortiers allégés doivent être des mortiers performanciels (cf. définition au paragraphe 2.1.1).

On nomme la classe du mortier par M, suivi de la résistance à la compression en MPa (M10 par exemple).

La clause 3.2.2 (1) de l'Annexe Nationale de la norme **NF EN 1996-1-1** donne des valeurs tabulées de mortiers d'usage courant (cf. tableau 2.1).

Éléments de maçonnerie	Mortier de chaux hydraulique	Mortier bâtard		Mortier de ciment
		Ciment	+ Chaux	
En pierre (calcaire, granit, grès)	250 à 350 kg/m³	150 à 275 kg/m³	100 à 200 kg/m³	
		Avec un dosage global de 350 à 400 kg/m³		
	M5	M5		
En pierre tendre (tuffeau de Touraine)		100 à 125 kg/m³	100 à 200 kg/m³	
		M 2,5		
En terre cuite	400 à 500 kg/m³	150 à 175 kg/m³	175 à 275 kg/m³	300 à 400 kg/m³
		Avec un dosage global de 350 à 400 kg/m³		
	M10	M10		M10
En béton	250 à 350 kg/m³	150 à 275 kg/m³	125 à 250 kg/m³	300 à 350 kg/m³
		Avec un dosage global de 350 à 400 kg/m³		
	M5	M10		M10
En béton cellulaire autoclavé	250 à 350 kg/m³	100 à 125 kg/m³	150 kg/m³ de chaux hydraulique	
	M5	M10		

Tableau 2.1 : Caractéristiques des recettes de mortiers de montage de maçonnerie (type G).

Dans ce guide, on utilisera les mortiers d’usage courant donnés dans l’Annexe Nationale de la norme **NF EN 1996.1.1** (M10), ainsi que des mortiers de joints minces (cf. paragraphe 3.1.1 de ce guide).

2.1.3.3. Béton et acier

■ Béton de remplissage

Le béton pour le remplissage (cf. article 3.3 de la norme **NF EN 1996-1-1**) doit être conforme à la norme **NF EN 206-1** [11]. La classe de résistance (C12/15 minimum), l’ouvrabilité et le diamètre des plus gros granulats sont précisés dans l’article 3.3.2 de la norme **NF EN 1996-1-1**. Les résistances caractéristiques à la compression et au cisaillement utilisables sont indiquées dans le tableau 3.2 de l’article 3.3.3 de la norme **NF EN 1996-1-1**. Dans ce guide, on ne considère la maçonnerie remplie de béton que pour les « blocs à bancher » (cf. paragraphe 3.4 de ce guide).

■ Acier d’armatures, acier de précontrainte

Acier d’armatures (cf. article 3.4 de la norme **NF EN 1996-1-1**), acier de précontrainte (cf. article 3.5 de la norme **NF EN 1996-1-1**) : les aciers d’armatures doivent être conformes à la norme **NF EN 10080** [12]. Dans ce guide, on ne considère pas la maçonnerie armée ni précontrainte. Toutefois, on disposera des aciers de chaînage (maçonnerie confinée dans l’Eurocode 6) dans le cas de sollicitations horizontales (cf. paragraphe 3.3 de ce guide).

2.1.3.4. Propriétés mécaniques de la maçonnerie

■ La résistance caractéristique à la compression f_k

La résistance caractéristique à la compression f_k est déterminée par les expressions (3.2), (3.3), (3.4) et le tableau 3.3 de l'article 3.6.1 de la norme **NF EN 1996-1-1** (valeurs du coefficient K), en fonction des résistances du mortier f_m et des éléments f_b :

- mortier d'usage courant et mortier allégé :

$$f_k = K f_b^{0,7} f_m^{0,3} ;$$

- mortier de joints minces, éléments de terre cuite des groupes 1 et 4 ou éléments d'autres matériaux :

$$f_k = K f_b^{0,85} ;$$

- mortier de joints minces, éléments de terre cuite des groupes 2 et 3 :

$$f_k = K f_b^{0,7} .$$

L'annexe D de la norme **NF EN 1996-3** donne des tableaux donnant les valeurs de f_k pour les différents types de bloc et pour différents mortiers. Dans ce guide, nous prendrons directement les valeurs de ces tableaux (cf. paragraphe 3.1.1 de ce guide).

Pour les maçonneries à joints interrompus (cf. définitions au paragraphe 2.1.1 de ce guide), les coefficients K utilisés dans les formules sont modifiés suivant les groupes (cf. article 3.6.1.3 de la norme **NF EN 1996-1-1**).

■ La résistance caractéristique au cisaillement f_{vk}

La résistance caractéristique au cisaillement f_{vk} (cf. article 3.6.2 de la norme **NF EN 1996-1-1**) est déterminée par des formules en fonction de la valeur initiale en l'absence de contrainte de compression f_{vk0} (donnée dans la clause 3.6.2 (6) et par le tableau 3.4 de l'Annexe Nationale de la norme **NF EN 1996-1-1**) en fonction du type d'élément et de mortier et de la contrainte de compression au niveau considéré σ_d :

- joints verticaux remplis :

$$f_{vk} = f_{vk0} + 0,4\sigma_d \leq 0,065f_b ;$$

- joints verticaux non remplis :

$$f_{vk} = 0,5f_{vk0} + 0,4\sigma_d \leq 0,045f_b ;$$

- maçonnerie à joints interrompus :

$$f_{vk} = \frac{g}{t} f_{vk0} + 0,4\sigma_d \leq 0,045f_b .$$

Pour les blocs de béton cellulaire autoclavé, f_{vk} est limité à $0,045f_b$, y compris pour le cas des joints verticaux remplis (cf. clauses 3.6.2 (3) et 3.6.2 (4) de l'Annexe Nationale de la norme **NF EN 1996-1-1**).

- Les résistances caractéristiques à la flexion parallèle au lit de pose f_{xk1} et perpendiculaire au lit de pose f_{xk2}

Les résistances caractéristiques à la flexion parallèle au lit de pose f_{xk1} et perpendiculaire au lit de pose f_{xk2} sont données dans un tableau de la clause 3.6.3 (3) de l'Annexe Nationale de la norme NF EN 1996-1-1.

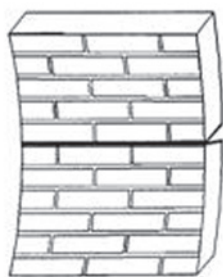


Figure 2.1 : Plan de rupture parallèle au lit de pose f_{xk1} .

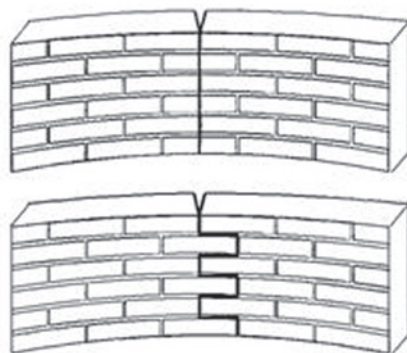


Figure 2.2 : Plan de rupture perpendiculaire au lit de pose f_{xk2} .

L'annexe D de la norme NF EN 1996-3 fournit une méthode simplifiée (tableaux) de détermination des résistances caractéristiques (compression, cisaillement et flexion) de la maçonnerie en fonction des matériaux des blocs, du groupe, de la résistance des blocs et du mortier utilisé.

Dans le paragraphe 3.1.1 de ce guide, sont présentés des tableaux récapitulatifs avec les différentes résistances caractéristiques en fonction des matériaux retenus dans ce guide.

- Résistance d'adhérence

Le tableau 3.5 de l'article 3.6.4 de la norme NF EN 1996-1-1 donne les caractéristiques d'adhérence d'une armature dans un béton de remplissage confiné (chaînage).

Le tableau 3.6 de l'article 3.6.4 de la norme NF EN 1996-1-1 concerne l'adhérence dans le mortier pour la maçonnerie armée.

- Les longueurs d'ancrage et de recouvrement pour les aciers de chaînage

Les longueurs d'ancrage et de recouvrement pour les aciers de chaînage figurent dans le paragraphe 2.1.8 de ce guide ou dans l'article 8.2.5.2 de la norme NF EN 1996-1-1.

2.1.3.5. Propriétés de déformation de la maçonnerie

Il est possible de choisir une relation contrainte-déformation non linéaire (cf. article 3.7.1 de la norme **NF EN 1996-1-1**).

Le module d'élasticité de la maçonnerie est fonction de sa résistance caractéristique à la compression : $E = 1000 f_k$ (cf. clause 3.7.2 (2) de l'Annexe Nationale de la norme **NF EN 1996-1-1**).

Le module de cisaillement peut être considéré égal à 40 % de E .

Pour le calcul des déformations, il faut tenir compte du fluage, de la dilatation et du retrait ou gonflement dû à l'humidité. Dans la clause 3.7.4 (2) de l'Annexe Nationale de la norme **NF EN 1996-1-1**, un tableau récapitule les différents coefficients à prendre en compte.

La détermination des modules est surtout utile pour les calculs de sollicitations (pour avoir la raideur relative entre les éléments) et pour la vérification éventuelle aux ELS (rare), (cf. paragraphe 2.1.7 de ce guide).

2.1.3.6. Composants accessoires

Coupure de capillarité, linteaux préfabriqués, attaches, feuillard : se référer à la norme **NF EN 845-1 + A1** .

Dans ce guide, les « accessoires » ne seront traités qu'en fonction des dispositions constructives (cf. paragraphe 2.1.8 de ce guide), leur dimensionnement ne sera pas abordé.

2.1.4. Durabilité

Cette section décrit les conditions pour que la maçonnerie ait la durabilité requise à son usage prévu, compte tenu des conditions d'exposition d'environnement.

On fait référence à la norme **NF EN 1996-2** pour la définition des conditions d'exposition (cf. annexe A de la norme **NF EN 1996-2**) et pour la durabilité des éléments de maçonnerie et du mortier (cf. paragraphe 2.2.2 de ce guide).

Le choix des aciers et les valeurs recommandées pour l'enrobage minimal en fonction de la classe d'exposition sont détaillés dans deux tableaux (cf. article 4.3.3 de la norme **NF EN 1996-1-1**).

Les maçonneries enterrées doivent être protégées en cas de risque d'humidité et/ou présence de produits chimiques dans le sol, le cas échéant (cf. article 4.4 de la norme **NF EN 1996-1-1**).

On considère que les murs sont dans un environnement sec (MX1), (cf. paragraphe 2.2.2 de ce guide), avec peu de variations de température.

2.1.5. Analyse structurale

Cette section présente les règles de calcul des actions sur les éléments structuraux compte tenu des interactions entre éléments voisins (fonction des rigidités relatives, des charges, etc.).

2.1.5.1. Généralités

La vérification des éléments de structure (murs par exemple) peut être faite de manière indépendante, sous réserve que la stabilité globale soit assurée (cf. clause 5.1 (3) de la norme **NF EN 1996-1-1**).

2.1.5.2. Analyse de la structure globale

La réponse de la structure peut être calculée (cf. clause 5.1 (4) de la norme **NF EN 1996-1-1**) en utilisant la théorie non linéaire (en utilisant la relation contrainte déformation décrite dans l'article 3.7.1 de la norme **NF EN 1996-1-1** ou en utilisant la théorie de l'élasticité linéaire – avec le module à court terme – cf. article 3.7.2 de la norme **NF EN 1996-1-1**).

Pour les situations accidentelles autres que séisme et feu (cf. article 5.2 de la norme **NF EN 1996-1-1**), il faut analyser le comportement structural en utilisant les actions accidentelles de la norme **NF EN 1991-1-7**  ou en étudiant l'enlèvement hypothétique des éléments porteurs essentiels à tour de rôle.

Les imperfections doivent être prises en compte dans le calcul (cf. clause 5.3 (1) de la norme **NF EN 1996-1-1**), en supposant la structure inclinée (angle forfaitaire indiqué dans la clause 5.2 (2) de la norme **NF EN 1996-1-1**).

Les effets du second ordre ne doivent être pris en compte que si la structure n'est pas suffisamment raidie (vérification avec l'expression (5.1) de l'article 5.4 de la norme **NF EN 1996-1-1**). Dans ce cas se reporter à l'annexe B de la norme **NF EN 1996-1-1**.

Ici, on ne considère pas l'analyse globale de la structure. On s'intéresse au dimensionnement des murs, lorsque le calcul des sollicitations sous charges verticales et horizontales est déjà fait.

2.1.5.3. Analyse des ouvrages structuraux

Murs chargés verticalement :

- calcul en flexion composée (charge verticale plus excentricité due au calcul des moments – planchers ou vent –) et excentricité initiale et/ou accidentelle (imperfection de réalisation) ;
- la hauteur effective h_{ef} est fonction des raideurs relatives des éléments voisins et de la qualité des liaisons (cf. article 5.5.1.2 de la norme **NF EN 1996-1-1**). Pour son calcul, on utilisera la méthode simplifiée qui se trouve dans la partie 3 de l'Eurocode 6 (cf. article 4.2.2.4 de la norme **NF EN 1996-3**). Ce calcul est décrit dans le paragraphe 3.2 de ce guide ;
- calcul de l'épaisseur effective t_{ef} , égale à l'épaisseur réelle, sauf pour les murs raidis par poteaux et pour les murs creux (cf. article 5.5.1.3 de la norme **NF EN 1996-1-1**) ;
- on ne considère pas les murs raidis par des poteaux (très peu utilisés en France). Pour les murs creux, selon la clause 5.5.1.3 (3) de l'Annexe Nationale de la norme **NF EN 1996-1-1**, l'usage courant en France correspond à une paroi intérieure porteuse et une paroi extérieure simplement tenue au déversement par des attaches. Dans ce cas, l'épaisseur effective du mur est l'épaisseur de la paroi intérieure porteuse ;
- calcul de l'élancement (cf. article 5.5.1.4 de la norme **NF EN 1996-1-1**) :

$$\frac{h_{ef}}{t_{ef}} < 27.$$

Murs soumis au cisaillement (cf. article 5.5.3 de la norme **NF EN 1996-1-1**) :

- calcul des parties de murs perpendiculaires qui peuvent servir de raidisseur, fonction de la liaison, des ouvertures, etc. (cf. clauses 5.5.3 (2), 5.5.3 (3) et 5.5.3 (4)) ;
- le calcul de la longueur de mur perpendiculaire pouvant être considéré comme jouant le rôle de raidisseur est détaillé au paragraphe 4.2 de ce guide ;

- considérations sur les planchers plus ou moins rigides et la répartition des charges horizontales (cf. clauses 5.5.3 (5) à 5.5.3 (10)). Ces clauses concernent la descente de charge. Les forces horizontales peuvent être réparties sur les murs de contreventement en fonction de leur rigidité (planchers considérés comme des diaphragmes rigides : cf. clause 5.5.3 (5)). Il faut aussi tenir compte des effets de torsion lorsque l'agencement des murs n'est pas symétrique (cf. clause 5.5.3 (6)).

Murs soumis à un chargement latéral (cf. article 5.5.5 de la norme **NF EN 1996-1-1**) :

- il faut d'abord déterminer les conditions d'appui et la continuité au droit des appuis sur les côtés (cf. clauses 5.5.5 (3) à 5.5.5 (6)). La liaison est considérée comme :
 - un bord libre : s'il y a un joint de fractionnement (cf. clause 5.5.5 (3)) ;
 - un appui simple : s'il y a une coupure de capillarité (cf. clause 5.5.5 (5)) sauf si la contrainte verticale de calcul est suffisante pour qu'il n'y ait pas de traction due au moment (cf. clause 5.5.5 (8)) ;
 - une liaison continue pour une liaison à un plancher en béton armé ou à un mur solidaire soumis à une charge verticale (cf. clause 5.5.5 (3)) ou à un mur creux avec des liaisons adéquates entre les deux parois (cf. clause 5.5.5 (6)) ;
 - une continuité partielle peut être supposée dans les autres cas (cf. clauses 5.5.5 (5) et 5.5.5 (6)) ;
- pour un mur appuyé sur trois ou quatre bords, le moment appliqué est calculé par la formule :

$$M_{Edi} = a_i W_{Ed} l^2 ;$$

où :

- i indique le sens de rupture (cf. figures 2.1 et 2.2) ;
- l est la longueur entre supports ;
- W_{Ed} est la charge de calcul latérale par unité de surface ;
- a_i sont les coefficients de moment fléchissant qui tiennent compte du degré de liaison sur les bords et du rapport hauteur sur longueur des panneaux ;
- les coefficients a_i peuvent être obtenus par une étude théorique adaptée (ex.: éléments finis avec plaques orthotropes si le mur est irrégulier ou présente des ouvertures importantes (cf. clause 5.5.5 (11) de la norme **NF EN 1996-1-1**). Pour des murs simples avec $t \leq 250$ mm, des valeurs sont données dans des tableaux en annexe E de la norme **NF EN 1996-1-1** en fonction du rapport des résistances à la flexion, du rapport hauteur sur longueur et des liaisons sur les bords ;
- pour un mur appuyé sur deux bords, le moment appliqué est calculé à partir de principes techniques classiques.

La maçonnerie armée n'est pas traitée ici. Il faut se reporter à l'article 5.5.2 de la norme **NF EN 1996-1-1** pour les ouvrages de maçonnerie armée soumis à un chargement vertical et à l'article 5.5.4 de la norme **NF EN 1996-1-1** pour les ouvrages de maçonnerie armée soumis au cisaillement.

2.1.6. État limite ultime

La vérification à l'état limite ultime consiste à s'assurer que la charge de calcul appliquée (indice « Ed ») soit inférieure à la valeur de calcul de résistance à cette charge (indice « Rd »).

Note

Les valeurs de calcul (indice « d » comme design) sont les valeurs caractéristiques affectées par les coefficients partiels des matériaux et des charges.

Trois cas principaux sont envisagés :

- les murs chargés principalement verticalement (vérifiés en flexion composée) ;
- les murs soumis au cisaillement (résistance uniquement sur la partie comprimée du mur) ;
- les murs soumis à un chargement latéral (vérifiés en flexion, avec influence de la charge verticale).

Deux autres cas doivent être également vérifiés :

- les murs soumis à des charges verticales concentrées ;
- les murs soumis à des charges latérales fonctionnant en voûte entre les supports.

■ Murs non armés chargés principalement verticalement

Ce cas est détaillé dans l'article 6.1.2 de la norme **NF EN 1996-1-1**.

La vérification se fait en flexion composée en affectant la résistance à la compression d'un coefficient de réduction prenant en compte les effets d'élançement et d'excentricité des charges. La vérification est faite à la base, au sommet et à mi-hauteur du mur.

La charge verticale de calcul par unité de longueur appliquée au mur N_{Ed} doit être inférieure ou égale à la valeur de calcul de la résistance aux charges verticales du mur N_{Rd} (cf. article 6.1.2.1 de la norme **NF EN 1996-1-1**) :

$$N_{Ed} \leq N_{Rd} = \phi t f_d.$$

Pour les murs dont la surface est inférieure à 0,1 m², la résistance à la compression f_d (cf. paragraphe 2.1.3 de ce guide) doit être multipliée par 0,7 + 3A (cf. clause 6.1.2.1 (3) de la norme NF EN 1996-1-1).

Les clauses 6.1.2.1 (4) à 6.1.2.1 (7) de la norme NF EN 1996-1-1 donnent des précisions sur la façon de tenir compte des murs creux ou à double parois et des cas où il y a des saignées.

Le coefficient de réduction pour l'élançement et l'excentricité ϕ est déterminé à partir d'un diagramme rectangulaire simplifié des contraintes.

Au sommet et à la base du mur (cf. clause 6.1.2.2 (1)(i) de la norme NF EN 1996-1-1) :

$$\phi_i = 1 - 2 \frac{e_i}{t};$$

$$e_i = \frac{M_{id}}{N_{id}} + e_{he} \geq 0,05t;$$

où :

- N_{id} est la charge verticale ;
- M_{id} est le moment fléchissant résultant de l'excentricité de la charge du plancher sur appuis (cf. figure 2.3) ;
- e_{he} est l'excentricité due aux charges horizontales le cas échéant (ex.: vent, etc.) ;
- e_{init} est l'excentricité initiale.

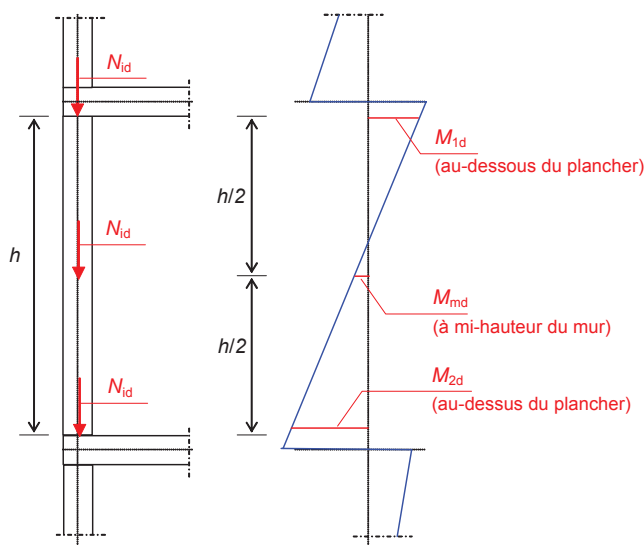


Figure 2.3 : Charge verticale et moments utilisés pour calculer le coefficient de réduction ϕ .