

2. Voiles minces. Voûtes et coques

2.1 Définitions. Généralités

Un **voile mince** (cf. article spécialisé [A 320] dans le traité *Sciences fondamentales*) est un solide, limité par deux surfaces courbes voisines, dont l'épaisseur est petite par rapport aux dimensions et aux rayons de courbure des surfaces limitant le voile mince. La surface située à mi-épaisseur du voile est sa **surface moyenne**.

Un volume élémentaire, limité par quatre plans normaux à la surface moyenne et orthogonaux entre eux, et auquel sont appliquées des forces de volume et de surface réparties, est soumis sur chacun des plans qui le limitent à des contraintes normales et tangentielles.

Si ces contraintes ont une valeur constante dans l'épaisseur du voile, on a affaire à un **équilibre de membrane** et à un **voile mince sans flexion**. L'équilibre d'un élément peut être schématiquement représenté comme indiqué sur la figure 5.

Dans le cas contraire, on a affaire à des voiles avec flexion ; il s'exerce alors sur les plans limitant le volume élémentaire considéré des couples de flexion et de torsion.

Remarque : certains auteurs réservent la dénomination de *voiles minces* aux voiles sans flexion (en équilibre de membrane) et celle de *coques* aux voiles avec flexion.

Outre l'article spécialisé dans le traité *Sciences fondamentales*, les questions concernant les voiles minces et les coques sont développées :

- d'une part, dans les ouvrages généraux de Résistance des matériaux, par exemple *Résistance des Matériaux* de J. Courbon (tome I, édition Dunod) et *Résistance des Matériaux appliquée* de M. Albigès et A. Coin (tomes I et II, éditions Eyrolles) ;
- d'autre part, dans des ouvrages plus spécialisés, par exemple ceux indiqués en [97] [100] [101].

Les voiles minces et les coques ont reçu des applications nombreuses et variées dans la réalisation de couvertures. Le lecteur en trouvera notamment des exemples en [100].

2.2 Couvertures en voiles plissés

Il s'agit de couvertures formées de voiles plans associés de façon à former des dièdres, des éléments prismatiques de section transversale trapézoïdale, ou des compositions plus originales [100] permettant de réaliser certains effets architecturaux dans les locaux de grandes dimensions (salles d'exposition, de congrès, etc.).

Les calculs sont souvent conduits suivant la méthode dite de la *poutre profilée*. Les dispositions de ferrillage s'apparentent à celles préconisées pour les parois fléchies (cf. [C 2 314]).

Pour plus de détails, le lecteur pourra se reporter utilement en [98].

2.3 Sheds conoïdes

Les sheds conoïdes permettent de réaliser des couvertures en shed d'ouverture assez grande.

La surface non vitrée est un conoïde dont les directrices sont (figure 6) :

- d'une part, un arc de fibre moyenne généralement circulaire, de flèche assez grande, dont le plan moyen est vertical ou peu incliné sur la verticale ;
- d'autre part, un arc de fibre moyenne généralement circulaire, de flèche beaucoup plus petite que le premier ; dans certains cas, on a même adopté une directrice rectiligne.

Les génératrices sont parallèles à un plan vertical normal au plan des surfaces vitrées.

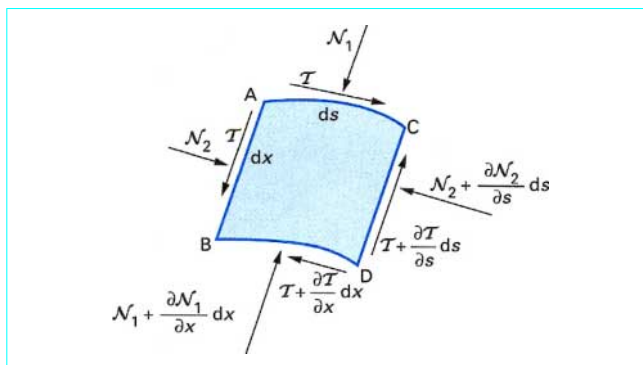


Figure 5 – Éléments de voile mince. Équilibre de membrane

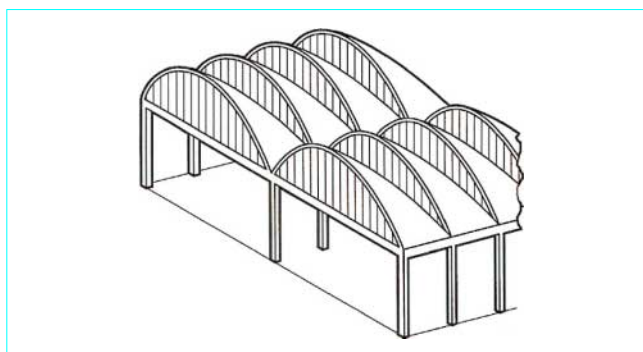


Figure 6 – Sheds conoïdes

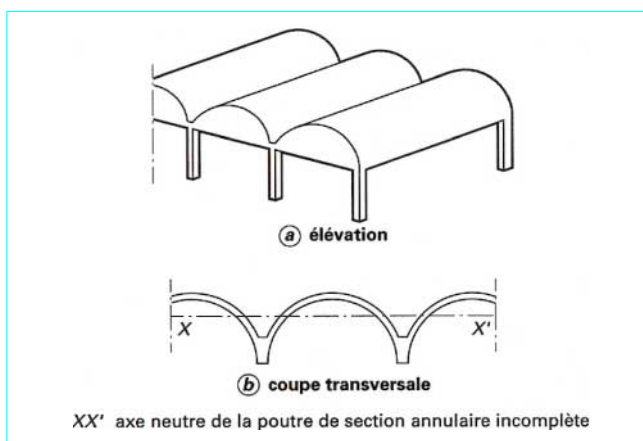


Figure 7 – Voûtes cylindriques autoportantes

2.4 Voûtes autoportantes

On désigne plus spécialement sous le nom de **voûtes autoportantes** des voûtes cylindriques comportant des tympans rigides et fonctionnant comme des poutres portant dans le sens des génératrices. On a construit des couvertures voûtées composées de telles voûtes accolées (figure 7a).

Dans cette solution, la voûte entière constitue une poutre de section annulaire incomplète (figure 7b). Les tirants sont placés

dans les tympans. On peut ainsi, avec des épaisseurs réduites, réaliser de grandes portées et avoir des parties de voûtes en porte à faux.

D'autres types de coques autoportantes (à double courbure par exemple), souvent préfabriquées, sont également utilisés. Leur exécution fait le plus souvent appel au béton précontraint.

2.5 Coques

2.5.1 Couvertures en paraboloïde hyperbolique

Les paraboloïdes hyperboliques peuvent être considérés comme des conoïdes dont les directrices sont des droites non concourantes ; un plan parallèle aux deux directrices définit une deuxième famille de génératrices rectilignes. Chaque point peut être défini par le croisement de deux génératrices qui forment le plan tangent à la surface au point considéré ; cette propriété permet une réalisation commode des coffrages qui explique la faveur de cette solution tant dans les ouvrages industriels que dans certains édifices publics.

2.5.2 Coupôles sphériques et ellipsoïdales

On a réalisé des couvertures en forme de coupôles sphériques ou ellipsoïdales, dont quelques-unes ont des dimensions importantes. Certaines coupôles sphériques sont en plein cintre, mais la plupart sont surbaissées, la pente de la tangente à la surface moyenne ne dépassant pas 30/100.

3. Murs en béton banché

Un mur en béton banché est un ouvrage en béton vertical, coulé à son emplacement définitif dans la construction entre deux coffrages (« banches »), plans ou courbes, de grandes dimensions, maintenus à écartement constant.

Les murs en béton banché comprennent habituellement des armatures de comportement ; ils ne sont toutefois considérés comme armés que s'ils contiennent, en plus, des armatures calculées en vue d'assurer leur stabilité.

Le DTU 23.1 [81] définit à la fois les règles de conception et les règles de calcul des murs en béton banché. Dans ce qui suit, on ne s'attache qu'aux secondes.

3.1 Classification des murs de façade

Dans son annexe « Guide pour le choix des types de murs de façade en fonction du site », le DTU 23.1 définit quatre types principaux de murs en fonction de l'exposition à la pluie, classés par ordre de résistance croissante au passage de l'eau :

- les murs ne comportant aucun revêtement étanche sur leur parement extérieur et soit :
 - aucune coupure de capillarité dans leur épaisseur (type I),
 - une coupure de capillarité continue dans leur épaisseur (type II),
 - une coupure de capillarité continue réalisée par une lame d'air, à la base de laquelle sont prévus des dispositifs de collecte et d'évacuation vers l'extérieur des eaux d'infiltration éventuelles (type III) ;
- les murs comportant un revêtement étanche sur leur parement extérieur (type IV).

Un tableau du DTU 23.1 indique le type minimal à prévoir en fonction de l'exposition, elle-même fonction de divers facteurs (situation, hauteur, etc).

3.2 Matériaux

■ Béton

Le dosage minimal en ciment est de :

- 300 kg/m³ en général et, en particulier, pour les murs extérieurs placés dans des conditions normales d'exposition, ou protégés par un revêtement rapporté ;
- 350 kg/m³ pour les murs exposés aux embruns ou aux brouillards salins.

L'affaissement mesuré au cône d'Abrams doit être compris entre 8 et 16 cm.

■ Acier

Le DTU 23.1 demande que le ferrailage d'un mur en béton banché soit convenablement raidi. Il en est ainsi lorsque l'on emploie comme armatures des panneaux de treillis soudé.

3.3 Dispositions constructives minimales

3.3.1 Généralités

Un mur est caractérisé par (figure 8) :

- son épaisseur a ;
- sa hauteur libre ℓ (distance libre entre deux planchers successifs, ou distance entre la face supérieure de la semelle de fondation et la sous-face du premier plancher) ;
- sa longueur libre de flambement ℓ_f (déterminée comme indiqué au § 3.4.1) ;
- une excentricité initiale e .

Le DTU 23.1 ne s'applique qu'aux murs remplissant les conditions suivantes :

- épaisseur : $a \geq 0,10$ m ;
- longueur : $c \geq 5a$;
- $\ell_f/a \leq 23$ (ce qui correspond à un élancement mécanique $\lambda \leq 80$) ;
- excentricité initiale e : au plus égale à la plus grande des deux valeurs 2 cm et $\ell_f/300$.

De plus, la résistance caractéristique f_{c28} prise en compte dans les calculs ne doit pas être supérieure à 40 MPa.

Dans le cas où l'une quelconque des conditions précédentes n'est pas remplie, la justification de la stabilité est faite au moyen des règles applicables aux poteaux (cf. [2 306]).

Les murs, qu'ils soient armés ou non pour la transmission des efforts pris en compte, subissent de multiples sollicitations (retrait différentiel dû aux phases de coulage ou à leur grande épaisseur par exemple, effets des variations thermohygrométriques ou des actions climatiques), qui nécessitent de prendre à certains niveaux des dispositions constructives minimales. Les armatures correspondantes sont dites « armatures de comportement ».

Si la justification de la stabilité et de la résistance du mur ne nécessite pas d'autres armatures, le mur est dit « non armé » ; dans le cas contraire, il est dit « armé ».

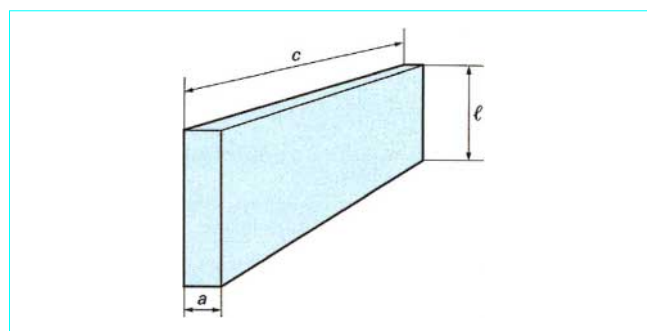


Figure 8 – Notations pour définir les dimensions d'un mur