

6.1.1 Prise en compte de l'action du vent

Pour ce type d'ouvrages, le vent est un des éléments essentiels du calcul ; il donne lieu d'une part à une action d'ensemble, d'autre part à des actions locales, qui doivent être déterminées en application des Règles NV 65 révisées (cf. article spécialisé [C 3 305] dans le présent traité et [41]).

L'action d'ensemble du vent sur l'ouvrage doit être étudiée :

- dans la direction parallèle à celle du vent, ce qui fait intervenir le **coefficient de traînée** c_t et un coefficient de majoration dynamique β définis dans les Règles NV ;
- dans la direction, perpendiculaire à celle du vent, suivant laquelle des phénomènes de vibration peuvent se produire sous l'effet des **tourbillons de Bénard-Karman** ; l'intensité maximale de ces vibrations se produit pour une vitesse du vent dite **vitesse critique**, inférieure à la vitesse correspondant au *vent extrême* des Règles ; la composante de la force du vent dans la direction perpendiculaire à celui-ci est la **force de dérive** dont l'expression fait intervenir un **coefficient de dérive** c_d et un coefficient de majoration dynamique β' également définis par les Règles NV.

Les **actions locales** du vent sur les parois des ouvrages à section annulaire résultent de la répartition des pressions du vent dont la figure 31 donne un diagramme à titre d'exemple ; ces pressions et les réactions intérieures de cisaillement qui les équilibrent déterminent dans la paroi des **moments d'ovalisation**.

6.1.2 Prise en compte des effets thermiques

Dans le cas des cheminées (ou des silos recevant des produits chauds), le gradient thermique résultant de l'écart important de température entre l'intérieur et l'extérieur de la paroi détermine dans celle-ci des moments de flexion qui agissent tant dans le sens vertical que dans le sens transversal (§ 6.1.3).

6.1.3 Sollicitations à prendre en compte dans la paroi verticale

Il convient de distinguer d'une part les sollicitations dues aux actions d'ensemble, d'autre part les sollicitations dues aux actions d'ensemble et aux actions locales. Les combinaisons d'actions à considérer sont fixées par les règles spécifiques de calcul de chaque catégorie d'ouvrage.

Ce principe général de calcul par superposition d'actions d'ensemble et d'actions locales est également applicable et généralisable à des anneaux non circulaires et même à des ouvrages tubulaires à section creuse. Cependant, les nœuds des immeubles-tours à usage d'habitation ne sont pas étudiés ici, car les questions spécifiques de contreventement qu'ils soulèvent ont déjà été évoquées en [C 2 312].

6.1.3.1 Sollicitations dues aux actions d'ensemble

Il s'agit des sollicitations qui intéressent l'ensemble de l'ouvrage et qui peuvent être rapportées au centre de gravité de toute section horizontale (figure 32) :

- l'effort normal N est dû au poids propre, aux équipements divers, aux charges d'exploitation, à l'action de portance du vent, au séisme ;
- le moment de flexion M est dû à l'action d'ensemble du vent, à une dissymétrie éventuelle des charges d'exploitation, à l'ensoleillement, aux actions du second ordre (dues au déplacement d'une section), au séisme ;
- l'effort tranchant V provient de l'action d'ensemble du vent ou de l'action du séisme.

Dans le cas de cellules non indépendantes (batteries de silos par exemple), il faut en outre tenir compte des efforts de liaison avec les autres cellules suivant les cas de charge, ou induits par la torsion d'ensemble sous l'action du séisme, etc.

Les sollicitations définies ci-dessus engendrent des forces verticales N_v par unité de longueur de chaque section horizontale de l'ouvrage, celui-ci étant considéré dans son ensemble comme un tube mince. La loi de distribution de N_v le long du contour de ce tube est déterminée en admettant la loi de Navier, dans l'hypothèse d'une structure élastique et non fissurée.

6.1.3.2 Sollicitations dues aux actions d'ensemble et locales

Il s'agit des sollicitations qui intéressent l'épaisseur du corps de l'ouvrage et qui peuvent être rapportées au centre de gravité de toute section de largeur unitaire soit dans le sens vertical, soit dans le sens horizontal (figure 33). On distingue ainsi, les indices h (horizontal) et v (vertical) désignant les directions des contraintes engendrées :

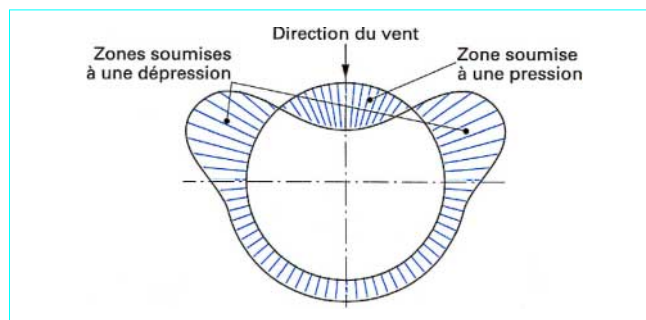


Figure 31 – Exemple de répartition des actions du vent sur une paroi circulaire

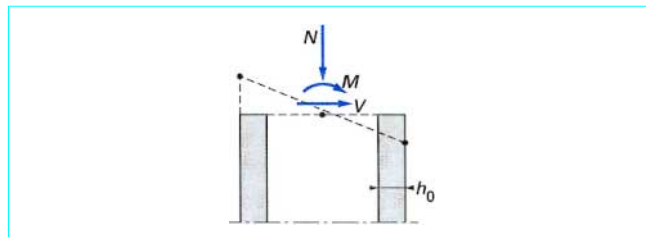


Figure 32 – Sollicitations dues aux actions d'ensemble

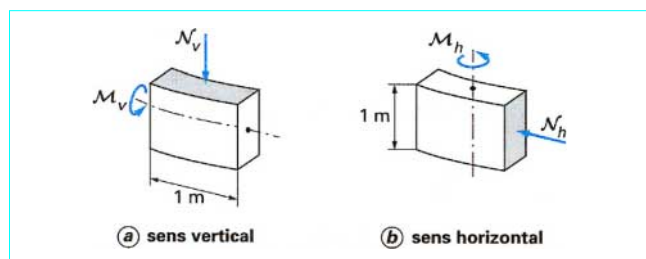


Figure 33 – Sollicitations dues aux actions d'ensemble et locales

■ dans le sens vertical :

- N_v effort normal provenant des actions d'ensemble ;
- M_v moment de flexion d'axe horizontal dû :
 - aux consoles supportant les plates-formes ou les escaliers (cas des tours hertziennes) ou le revêtement intérieur, s'il existe (cas des cheminées) ;
 - aux liaisons rigides de la paroi à ses extrémités ;
 - à l'action d'un gradient thermique $\Delta\theta/h_0$ éventuel dans l'épaisseur h_0 de la paroi :

$$M_{\Delta\theta} = \alpha_\theta \frac{\Delta\theta}{h_0} EI$$

avec α_θ coefficient de dilatation thermique du béton ($\alpha_\theta = 10^{-5}/^\circ\text{C}$),

EI facteur de rigidité de la paroi.

Les Règles professionnelles pour le calcul des silos [106] fournissent un mode de calcul de $\Delta\theta$, ainsi que les valeurs conventionnelles de E et I à introduire dans l'expression précédente pour tenir compte de la réduction de rigidité de la paroi sous l'effet de la fissuration, dans les divers cas de flexion simple ou composée, avec compression ou avec traction, qui peuvent se présenter. Dans le cas où la totalité de la section est comprimée par exemple (compression simple ou flexion composée avec compression) :

$E = E_v$ module de déformation différée du béton

$$I = \frac{h_0^3}{12}$$

Dans le cas de la flexion simple, $E = E_v$ et I dépend du pourcentage d'aciers tendus. Dans le cas d'une section entièrement tendue, $E = E_s$ module d'élasticité de l'acier et I est le moment d'inertie de la section réduite à ses seules armatures, par rapport au centre de gravité de celles-ci.

■ dans le sens horizontal :

- N_h effort normal tangentiel dû :
 - à la poussée du contenu (cas des silos) ;
 - au vent ;
 - au séisme.
- M_h moment de flexion d'axe vertical dû :
 - à l'ensoleillement ;
 - à l'ovalisation sous l'effet du vent (ou d'une vidange géométriquement anormale dans le cas de certains silos) ;
 - au gradient thermique éventuel ;
 - aux liaisons éventuelles le long de certaines génératrices (cas de silos à cellules circulaires accolées).

Remarque : pour un silo (ou un réservoir) à parois non circulaires, le moment M_h est également dû à la poussée du contenu (voir, par exemple, figure 37).

Les sections unitaires ci-dessus considérées sont ensuite vérifiées en flexion composée sous l'effet des sollicitations combinées (N_v et M_v) ou (N_h et M_h) aux états-limites de résistance (sans effets du 2^e ordre) et/ou aux états-limites de service suivant les exigences particulières relatives au type d'ouvrage considéré (réservoir, silo, cheminée, tour, etc.) Dans tous les cas, la section du béton tendu est négligée (figure 34).

6.1.4 Déformations

L'étude des déformations devient nécessaire pour certains ouvrages élancés dans lesquels le rapport entre le diamètre à la base et la hauteur de l'ouvrage est fréquemment de l'ordre de 1/15 et peut atteindre 1/20. Des déformations excessives peuvent en effet

provoquer des perturbations dans la transmission des signaux pour les tours hertziennes ou des désordres dans les revêtements en briques des cheminées.

Remarque : les tours hertziennes sont distantes d'environ 50 km. Le faisceau hertzien échappe à la parabole réceptrice pour un écart de $\pm 4/1\,000$ rad autour de l'axe joignant la parabole émettrice et la parabole réceptrice.

Les rotations au sommet et les déformations d'ensemble peuvent être dues :

- à l'ensoleillement, en raison des différences de température entre une face exposée au soleil et la face opposée ;
- à l'action du vent sur la construction fonctionnant en console encastrée dans sa fondation, cette dernière pouvant d'ailleurs subir une rotation si le sol d'appui est compressible.

6.1.5 Fondations des ouvrages à section annulaire

Les ouvrages à section annulaire peuvent être fondés sur un radier général ou sur une semelle annulaire (figure 35)

Le calcul de telles fondations est donné en [95].

6.2 Cheminées et tours

Pour l'étude des cheminées et des tours, il convient de se référer aux documents suivants :

- Règles applicables à la construction des cheminées en béton armé [113] ;
- Règles applicables à la construction des tours en béton armé [114].

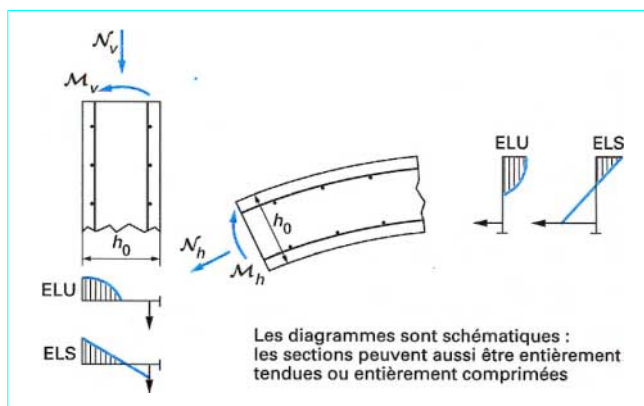


Figure 34 – Vérifications sous les sollicitations M et N

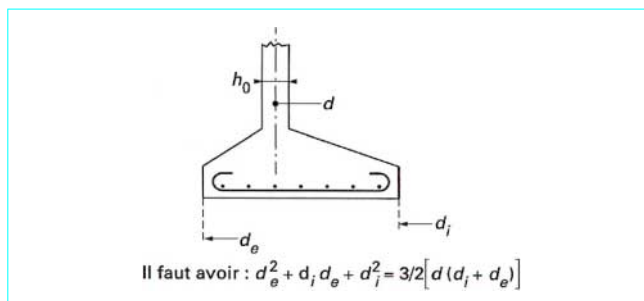


Figure 35 – Coupe d'une semelle annulaire

Ces deux textes, assez anciens et jamais révisés, ont été établis dans le cadre d'une réglementation aux contraintes admissibles (Règles CCBA 68) ; leur transposition à des méthodes de calcul aux états-limites a donné lieu à quelques études comparatives [117] mais, jusqu'à présent, elle n'a pas été faite d'une façon systématique. Il convient cependant de mentionner à ce sujet les travaux du *Comité international des cheminées industrielles* (CICIND, dont le secrétariat se trouve à Düsseldorf) qui ont abouti, en 1984, à la rédaction d'un *Code-Modèle pour les cheminées en béton* (Model Code for Concrete Chimneys) assorti de commentaires (1987). Ce texte n'a aucun caractère réglementaire, et bien qu'une enquête ait été lancée à son sujet par le Comité européen de normalisation en 1992, la publication d'un « Eurocode pour les cheminées en béton » n'est pas encore envisagée.

6.2.1 Vérifications des conditions de sécurité

Elles doivent être conduites conformément aux prescriptions des *Règles* évoquées ci-dessus. Pour les cheminées, il est prévu deux catégories d'ouvrages :

- catégorie A, pour les cheminées de hauteur totale supérieure à 120 m ou présentant en une section quelconque un rapport hauteur/diamètre supérieur à 20, ou en cas de spécification du maître d'ouvrage ;
- catégorie B, pour celles qui n'entrent pas dans la catégorie précédente.

Tant pour les tours que pour les cheminées, il est imposé deux sortes de vérifications [113] [114] :

- sous sollicitations du premier genre (états-limites de service) ;
- sous sollicitations du second genre (pseudo-calculs à l'état-limite ultime), en considérant à chaque fois successivement les sollicitations dues aux actions d'ensemble, et celles dues aux actions d'ensemble et aux actions locales.

Les coefficients de pondération des diverses actions et les contraintes admissibles ont des valeurs qui varient dans les différents cas étudiés.

En raison de l'importance des sollicitations d'origine thermique, les problèmes relatifs aux cheminées sont en général plus complexes que ceux concernant les tours.

Des exemples de calculs sont donnés notamment dans [120].

6.2.2 Solutions constructives

Les cheminées en briques ont été progressivement abandonnées en raison de l'accroissement de hauteur des cheminées industrielles, des difficultés de recrutement de main-d'œuvre qualifiée et des délais de construction.

Maintenant, on ne construit pratiquement plus qu'en utilisant les techniques des coffrages glissants ou grimpants [135], ce qui impose une épaisseur minimale de paroi (12 cm).

Les tours de télécommunications ou de contrôle sont, elles aussi, édifiées le plus souvent en coffrage glissant ou grimpant. Une des principales difficultés résulte de la présence de planchers et de plates-formes en porte à faux de grandes dimensions ; ces dernières et leurs consoles-supports sont souvent exécutées en métal, assemblées au sol et hissées à leur niveau par levage.

Il ne peut être question, dans le cadre du présent article, de définir avec plus de précision les solutions constructives de ces ouvrages dont la plupart soulèvent des problèmes spécifiques qui ne peuvent être abordés que par des spécialistes.

6.3 Réfrigérants atmosphériques

Un réfrigérant atmosphérique est un ouvrage destiné à assurer le refroidissement de l'eau d'un circuit relié par ailleurs à une source de calories inutilisable : condenseur de turbine, appareil thermique,

machine, etc. Il comprend essentiellement une enveloppe, des ouvrages hydrauliques, une ossature support de l'équipement de distribution et de refroidissement de l'eau, et des ouvrages annexes.

Pour le principe et le détail du fonctionnement, on se reportera à l'article *Réfrigérants atmosphériques* [B 2 481] dans le traité Génie énergétique.

On distingue les réfrigérants atmosphériques à tirage naturel, (RATN), qui comportent une coque externe de révolution formant cheminée, et les réfrigérants atmosphériques à tirage induit (RATI) dont l'enveloppe est constituée par des voiles verticales et qui comportent un plancher interne support des ventilateurs et diffuseurs.

Seules sont visées ici les coques des RATN.

Ces coques peuvent affecter la forme d'une hyperboloïde de révolution, d'un tronc de cône (simple ou double, en *diabolo*) ou d'un cylindre. La forme hyperboloïde est la plus fréquente, car elle est esthétique et permet d'obtenir, du fait de la double courbure de la paroi, les qualités de résistance souhaitées, en particulier au vent, avec des épaisseurs de béton minimales.

Bien qu'il s'agisse d'ouvrages à section annulaire, leur conception et leurs proportions en font des ouvrages très particuliers, auxquels les méthodes exposées aux paragraphes 6.1 et 6.2 ne sont **absolument pas applicables**.

Les problèmes qui se posent viennent des dimensions d'ensemble considérables (hauteur : 100 à 165 m ; diamètre : de 50 à plus de 120 m) par rapport à l'épaisseur (15 à 22 cm en moyenne).

Étant donné ces proportions, la stabilité de forme de la paroi vis-à-vis du cloquage doit être vérifiée très soigneusement, aussi bien sous l'action du poids propre que sous celle du vent ; cette vérification est complexe.

L'équilibre statique est également à vérifier pour tout état d'avancement de l'ouvrage, compte tenu des actions susceptibles de s'exercer (en particulier, charges temporaires de chantier, actions du vent).

Pour le calcul, la théorie des poutres de la Résistance des Matériaux, qui repose principalement sur la loi de Navier, est inapplicable ; la théorie des membranes ou celle des coques fléchies peuvent seules convenir (cf. article *Voiles minces* [A 320] dans le traité Sciences fondamentales).

Souvent, on utilise des méthodes de calcul aux éléments finis, avec recours à l'ordinateur. Les actions à considérer sont la pesanteur le vent, le séisme, la température de l'air humide intérieur, la température extérieure, l'ensoleillement. Toutes ces actions ont, individuellement ou combinées, des effets complexes.

Un projet de « Règles professionnelles applicables à la construction des réfrigérants atmosphériques en béton armé » a été établi, en juin 1986, par une commission du SNBATI [185].

Ce texte n'a jamais été publié. Il définit les combinaisons d'actions à considérer pour les états-limites de service et les états-limites ultimes – combinaisons fondamentales et combinaisons accidentelles – dans tous les cas possibles de fonctionnement : marche en été, marche en hiver avec vent, ou neige, ou séisme, ou bien arrêt en été, en hiver, etc.

Bien que les états-limites ultimes soient envisagés, pour les vérifications de béton armé proprement dites, les conditions relatives aux états-limites de service sont le plus souvent déterminantes : la paroi est soumise à l'intérieur à une attaque par l'eau pure (eau de condensation) et à l'extérieur au ruissellement des eaux de pluie. La fissuration est toujours préjudiciable et la contrainte de traction du béton doit être limitée de manière que l'on soit assuré de la non-fissuration systématique de la coque sous vent extrême.

L'accident survenu à Ferrybridge (Grande-Bretagne) le 1^{er} novembre 1966 où un vent, certes de tempête mais non exceptionnel, entraîna l'effondrement de trois grands réfrigérants, a mis clairement en évidence d'importance d'une définition correcte des actions, d'une analyse par le calcul précise et rigoureuse et d'une