

# PROBLÈMES STRUCTURAUX ET DE RÉSISTANCE RELATIFS AUX MURS LÉGERS PARTIELLEMENT MÉTALLIQUES

par

J. BARTHA—S. KARÁCSON

Chaire du Bâtiment, Université Technique de Budapest

(Reçu le 15 janvier 1972)

Présenté par le Prof. L. LUX

Un des composants les plus importants de la construction légère complexe est le mur léger, en partie métallique. Bien que des exemples de murs multicouches de construction étrangère ou hongroise, d'une inertie thermique réduite, fournissent un grand nombre de solutions variées, néanmoins leur évolution n'a pas abouti à une perfection définitive. La plupart des versions de projets ont été faites selon les méthodes de calcul simplifiées et nombre de facteurs ont été ignorés, dont la considération nous aurait amenés à une solution plus efficace et à une meilleure utilisation du matériau.

Dans cette étude, les effets et les exigences y relatives seront discutés qui se peuvent produire en excédant dans le cas de l'application des murs légers par rapport aux murs traditionnels.

## Les charges

Dans les calculs de résistance, il faut tenir compte des charges suivantes:

Le poids propre du mur et celui de la squelette (bien entendu, compte tenu des changements probables qui peuvent intervenir dans l'avenir, comme p. ex. la dessiccation ou le mouillage); les charges de pression et d'aspiration dues aux effets de vent, agissant perpendiculairement sur, ou parallèlement à la surface. La distribution des poussées du vent sur la surface, considérant, en particulier, les maxima locales aux coins et aux arêtes, ainsi que les coups de vent et le décollement des tourbillons cycliques. En faveur de l'uniformisation de la fabrication, il convient de construire le mur d'un nombre d'éléments réduit d'une façon précise pour répondre aux exigences de l'interchangeabilité et de la flexibilité du plan. Ceux-ci doivent être calculés pour des charges soit extrêmes soit moyennes, cependant, dans ce dernier cas, aux endroits des charges maxima locales, le nombre de supports doit être augmenté.

Le mur, suivant la fonction qu'il doit remplir dans l'ensemble de la construction, subit, le cas échéant, aux charges transmises par l'entretoise-

ment de l'ossature. Dans ce cas, en plus de la charge du vent, celle d'un pont roulant, par exemple, peut aussi agir simultanément. Les valeurs extrêmes probables du poids propre et de la charge du vent sont étroitement liées à la durée de vie prévue du bâtiment. C'est pourquoi il convient de fixer les coefficients de dispersion et les marges de sécurité en fonction de la durabilité de l'ouvrage. Le dimensionnement pour les charges extrêmes réduit l'économie du système par la prévision des marges de sécurité irraisonnables.

*Les effets de charge* qui s'ajoutent aux forces des charges et auxquels le mur et ses jonctions doivent également résister, sont les suivants:

- les effets dus aux mouvements thermiques restreints, causés notamment par la variation de température uniforme de l'ensemble de la structure de mur, par la variation de température et la dilatation différentielles des éléments de mur assemblés, ainsi que par le gradient de température à travers le mur,

- les contraintes internes initiales et les excentricités provenant des *imprécisions d'assemblage et d'étayage* ainsi que les efforts causés par le tassement de l'ossature du bâtiment ou du mur.

*Charges particulières*, comme la grêle, jets de cailloux, appui des échelles contre le mur, coups de pied, adossement, chocs, ainsi que des efforts dynamiques engendrés par le traitement plus ou moins brutal des portes et des fenêtres, les effets résultant du poids et du déplacement des équipements de nettoyage de la façade du bâtiment, etc.

Dans le cas de bâtiments industriels, aux effets cités plus haut vont s'ajouter les efforts causés par les équipements mécaniques spéciaux appartenant à la fonction normale du bâtiment. Tels sont, dans le cas de l'entreprise de transports automobile (AKÖV), par exemple:

- dans des locaux de lavage, l'effet dynamique du jet d'eau appliqué au lavage soit mécanique, soit à main,

- les vibrations excitées par les aspirateurs d'air montés aux murs extérieurs des locaux exigeant une intense ventilation forcée,

- les vibrations des agrégats (compresseurs) alimentant les conduites à air comprimé de l'usine, compte tenu de supports antivibratils appliqués aux fondations de machine,

- les efforts additionnels engendrés par les excentricités de montage des armatures lourdes des installations (sanitaires, électriques, etc.).

*Les propriétés des matériaux structuraux* — en outre les caractéristiques d'élasticité, de fluage et de rupture — celles de la fatigue, de la résistance au choc, à l'entaille, de la déformation lente (relaxation), recristallisation et corrosion.

La sauvegarde de la *stabilité* (contre dérapage et renversement) de la structure qui, eu égard à la légèreté de la structure, a une incidence prépondérante au choix de l'ossature du bâtiment.

Il est opportun de prévoir la grandeur des *déformations et des flèches* de la façon que, pendant la déformation, les éléments connectés ne se transmettent pas de charges dangereuses, et que la fermeture des joints ne souffre pas d'une mesure préjudiciable au fonctionnement parfait — ni même instantanément.

L'essai de résistance des murs légers en partie métalliques — étant donné la nouveauté du problème — n'a pas été encore formulé en régulation ou norme, réglé par des instructions ou par standardisation. La méthode de l'application des charges, du calcul des contraintes et de la vérification de la capacité portante exposée ci-après ne veut être qu'une approche viable de l'analyse de la résistance et ne veut que donner quelques idées pour la rédaction des normes y relatives.

Au-delà des prescriptions des normes, jusqu'à l'apparition des cahiers de charge particuliers, le calcul peut se baser sur les effets suivants, décidés par appréciation:

— les tolérances de montage dans le plan du mur entre les jonctions de  $\pm 1$  mm; normalement au parement, de  $\pm 2$  cm:

— la variation de poids de chaque couche dans le temps, conformément aux instructions (absorption de vapeur, condensation);

— la valeur optimale prévue de la charge du vent à considérer conformément aux prescriptions du règlement, avec les facteurs de majoration suivants par rapport au coup de vent d'une occurrence quinquennale:

pour 5 ans:	1,0
pour 10 ans:	1,1
pour 20 ans:	1,2
pour 40 ans:	1,3
pour 80 ans:	1,4;

— pour calculer l'effort dynamique provoqué par les coups de vent, il faut connaître la fréquence propre ou la période d'oscillation de l'élément. La fréquence se calcule à partir de la flèche  $\delta$  (cm) de l'élément chargé de son poids propre, à l'aide de la formule  $n_1 = 5/\sqrt{n\delta}$ . Les effets dynamiques provoqués par les coups de vent sont indiqués dans le Tableau 1 en fonction de la fréquence propre et de la durée du coup de vent;

— les déplacements engendrés par les poussées du vent doivent correspondre au système d'assemblage et de jointoiement de la structure. Des mouvements des couches de surface et de l'ossature portante du mur, il faut tenir compte en les cumulant:

— les charges des armatures scellées dans les murs ainsi que les charges transmises à partir de portes et de fenêtres (qui sont à appliquer en conformité de la suggestion de l'Institut de Contrôle de Qualité de l'Industrie du Bâtiment (ÉMI);

— charges à choc et d'appui attaquant les parements extérieurs et intérieurs;

— efforts transmis par l'équipement de nettoyage des façades du bâtiment:

— les efforts à choc et poussées de la grêle qui peuvent être considérés avec une majoration de 10 % de la poussée de refoulement;

— les variations de température uniformes et non uniformes entre et à l'intérieur des couches;

— les efforts et charges produits par l'entretoisement de l'ossature de l'ouvrage et par la coaction des éléments en décollant;

— les sollicitations particulières de la fonction du bâtiment.

Ces charges et efforts sont à diviser selon conditions de service normal et extraordinaires, conformément aux instructions de la norme y relative ou à une suggestion ultérieure.

Coefficients dynamiques des coups de vent

Fréquence propre		Durée des coups de vent					
Vibrations 1/sec	période T sec	1/2	1	2*	3	4	5
10	1/10	1,050	1,025	1,020	1,015	1,010	1,005
5	1/2	1,275	1,130	1,065	1,040	1,030	1,025
1	1	1,745	1,275	1,130	1,085	1,065	1,050
0,5	2	1,935	1,745	1,275	1,175	1,130	1,100
0,333	3	1,970	1,880	1,585	1,275	1,225	1,175
0,200	5	1,990	1,920	1,820	1,650	1,450	1,275

\* Durée de calcul, faute de données mesurées

Pour tenir compte de l'effet de la corrosion au-delà du terme garanti d'anticorrosion, les dimensions de la section transversale portante doivent être réduites d'un taux dépendant de la qualité du matériau et de l'agressivité de l'atmosphère (dans le cas d'un acier au carbone sans traitement anticorrosif, par exemple, le taux de la réduction de l'épaisseur peut atteindre une valeur de 0,1 mm par an).

Du point de vue de la capacité portante, les écarts de la géométrie de celle projetée (excentricité, gauchissement) doivent être considérés, dans la mesure où les tolérances peuvent être égalisées régulièrement par la construction.

La complexité des sollicitations dans les murs légers résulte de celle du système structural (panneaux ondulés de faible résistance au cisaillement; portiques spatiaux) ainsi que de la grande variété des effets statiques et dynamiques et des caractéristiques particulières des matériaux structuraux (fatigue, résistance au choc).

Pour pouvoir suivre — au moins approximativement — la répartition des efforts compliquée, calculer chaque effort séparément, les superposer et pour que les contraintes et déplacements constituent un système uniformément corrélatif, il paraît être utile de procéder d'après les principes de la *théorie de l'élasticité linéaire*.

En vertu des normes  $\gamma$  relatives et de ce qui était écrit dans les deux alinéas précédents, des modèles de calcul simples ou compliqués peuvent être établis. Il paraît opportun que la simulation par des modèles de forme tout à fait nouvelle, inhabituelle, soit vérifiée à voie expérimentale.

Dans le cas de grandes séries, les effets de certains types de charge peuvent être analysés à l'aide des essais effectués et sur des maquettes et sur modèles de vraie grandeur. Conformément à ce que nous avons dit plus haut, l'évaluation des essais se bornera au domaine élastique.

La détermination des contraintes à la base des principes de la théorie de l'élasticité assure une relation bien définie entre les *contraintes* et les *déformations*; les effets des charges et des déplacements chargeants restreints peuvent être superposés tant en contraintes qu'en déformations.

Dans le cas de matériaux ayant une tendance accentuée au fluage à l'effet des contraintes soutenues, ce phénomène peut être fait entrer dans le calcul par la linéarisation de la loi de fluage.

En vérifiant la capacité portante du mur léger, il faut démontrer que l'état de contrainte calculé aux points caractéristiques de la structure à partir de différents groupements possibles des charges et des efforts, n'atteint pas l'état limite correspondant à l'état de contrainte composé.

En procédant ainsi, les états limites de contrainte de différents matériaux doivent être définis en guise de normes et, dans le cas des problèmes de résistance connexes à la stabilité, la valeur de calcul de l'excentricité aléatoire et le comportement du matériau de base et les formes structurales du point de vue de la fatigue doivent être considérés, compte tenu des imprécisions de fabrication et de montage.

### Les combinaisons possibles des charges et des effets

#### *État de service normal*

Charges et effets permanents:  
valeur moyenne du poids propre,  
imprécisions de montage,  
valeur extrême de l'excentricité aléatoire;

*charge due à la poussée du vent:*

charge locale due au vent ainsi que son effet dynamique superposé à l'intensité moyenne des charges du vent pendant la vie utile de l'ouvrage;

*variations de température uniformes:*

$\pm 25$  °C en comparaison de la température de montage ( $+10$  °C);

*variations de température non uniformes:*

$\pm 20$  °C superposé à la variation de la température uniforme entre les couches extérieures et intérieures:

*coaction avec l'ossature de l'ouvrage:*

sur la base des charges et effets de service cités plus haut.

L'analyse pour l'état de service normal se fera sur la base des dimensions du projet; le rapport de l'état de contrainte admis majoré par l'effet de la fatigue à l'état de contrainte limite sera au moins de 1 : 1,5.

*État extraordinaire. Valeurs extrêmes des charges et effets permanents.**Charge du vent:*

obtenue par la superposition à la charge locale du vent à une intensité moyenne, de la poussée maximale probable du vent pendant le double de la vie utile du bâtiment et de l'effet battant de la grêle.

*Variation de température uniforme*  $\pm 35$  °C,

*variation de température non uniforme*  $\pm 25$  °C.

*Charges au choc:*

produites par des objets mous ou solides.

A l'analyse de l'état anormal, pour tenir compte de l'effet de la corrosion on prendra pour base des dimensions affaiblies de la section; le rapport de l'état de contrainte admis, majoré par l'effet de la fatigue, à l'état de contrainte limite sera au moins de 1 : 1,1.

Le support des charges de choc produites par des objets tranchants qui ne peut être examiné que par des essais, doit être vérifié indépendamment de toutes autres charges.

Conformément aux précédents, *la capacité portante* peut être vérifiée par la mise en corrélation à l'état de contrainte limite, proportionnel à l'état de contrainte admis. L'état de contrainte limite est la valeur de seuil de l'état de fluage correspondant à la dispersion des caractéristiques de matériaux. La valeur de seuil peut être évaluée en conformité des normes existantes. La capacité portante vérifiée par des essais de rupture ne peut être prise

pour base de calcul qu'avec considération, étant donnée que de tels essais laissent à côté l'état de contrainte dynamique extraordinairement compliqué, ainsi que les propriétés de fatigue du matériau.

L'avènement du mur léger a changé les conditions de la stabilité (dérapage et renversement) de l'ensemble de l'ouvrage comparé au mur lourd de structure traditionnelle, en effet, le poids propre qui s'oppose aux forces horizontales et au moment de renversement se réduit tandis que les efforts horizontaux (charges du vent) ne sont pas fonction du poids de l'ouvrage. Donc, les types d'ossatures développés pour les bâtiments lourds exigent une révision, afin de ne pas perdre le temps qui peut être gagné par le montage accéléré du mur léger, par les travaux prolongés de la fondation. Les inconvénients de la réduction de poids peuvent être contrebalancés par la mise en œuvre d'une semelle de forme s'opposant au dérapage (p. ex. au plan oblique de fondation), et par le choix convenable du système de l'ossature portante du bâtiment (par l'application des portiques aux angles rigides).

*Des essais sur modèles réduits* des murs légers partiellement métalliques, en connexion avec les calculs de résistance, visaient, en premier lieu, l'évaluation de l'effet de raidissement, difficile à calculer. A cet égard, à part des essais prévus par l'Institut Scientifique du Bâtiment, O. Steinhardt a publié dans le numéro d'octobre 1970 de la périodique «Bautechnik» une formule vérifiée par des essais pour la définition du module de cisaillement réduit d'une plaque trapézoïdale de raidissage.

Dans le cas des *structures sandwich* on a examiné à l'aide des essais l'incidence de la faiblesse à cisaillement du noyau en matière mousse à la raideur du panneau entier. Les essais ont justifié les hypothèses de la théorie de l'élasticité concernant les plaques faibles à cisaillement (U. S. Sandwich Panel Manufacturing).

La coaction de *l'ossature portante* et de la *coque de surface du mur* a été également examinée par des essais. A cet égard c'était surtout l'effet de la variation de température non uniforme qui s'échappait à la mise au point théorique. En effet, la couche calorifuge, par suite de son hygroscopicité et sa teneur d'humidité, sous l'effet de chaleur rétrécit d'une façon non uniforme, tout en perdant de l'humidité. Les efforts qui en résultent ne peuvent être déterminés qu'à l'aide des essais. (Cahiers du CSTB No 94 822.)

Les variations de température uniforme et non uniforme donnent lieu aux déplacements et rotations du mur dans son plan, d'une part et normalement à celui, d'autre. Ces mouvements sont entravés et même empêchés par les jonctions de l'ossature.

La structure du mur agit dans le plan du mur en disque anisotrope et normalement sur celui en plaque anisotrope, par suite de l'entravement des déplacements chargeants. Aux points de jonction de différents matériaux où tant les échauffements que les coefficients de dilatation thermique se dif-

fèrent, des importants efforts locaux peuvent aussi prendre naissance. Les déplacements et contraintes engendrés par les variations de température varient périodiquement suivant les fluctuations journalières et saisonnières, néanmoins, dans un moment donné, des mouvements thermiques très différents peuvent aussi avoir lieu par suite de l'ensoleillement ou l'ombre atteignant certaines surfaces du bâtiment de différents matériaux, et par suite de la circulation d'air autour du bâtiment. Quoi qu'il en soit, la surface subissant l'effet thermique extrême dépend de l'orientation du bâtiment. Il faut tenir compte de ces effets thermiques différentiels pour la connexion des façades de matières et orientations différentes.

A titre d'exemple, vérifions la résistance du mur illustré sur la figure, conformément à la norme proposée pour l'étude des constructions.

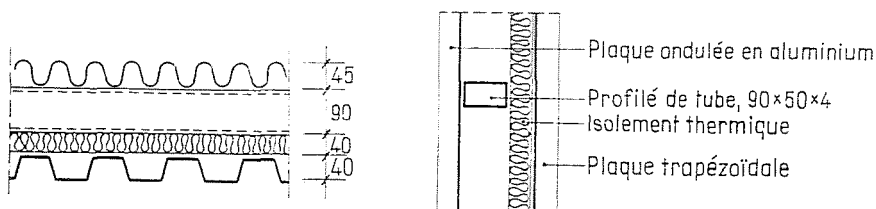


Fig. 1

### La charge des murs extérieurs

Parmi les charges et effets permanents, le poids propre engendre dans les murs des contraintes négligeables et, en ce qui concerne les imprécisions de montage, par suite des jonctions assurant le respect des tolérances, ceux-ci n'ont aucune répercussion à la structure.

La valeur extrême de la charge du vent (en prenant pour base une durée de service prévue de 20 ans d'un bâtiment pas plus haut de 10 mètres), à savoir, la poussée de refoulement du coup de vent d'une fréquence de 40 ans sera

$$1,3 \cdot 70 = 90 \text{ kg/m}^2.$$

Le facteur de forme de la charge due au vent est de 0,8.

Calcul du facteur *dynamique* du coup de vent:

La flèche de la structure sous l'action du poids propre:

$$\delta = \frac{5}{384} \cdot \frac{0,47 \cdot 180^4}{600\,000 \cdot 24,8} = 0,43 \text{ cm.}$$

La fréquence propre de la construction est:

$$n_1 = \frac{5}{\sqrt{0,43}} = 7,6 \text{ l/sec.}$$

Pour un coup de vent de 2 sec., le facteur dynamique  $\mu = 1,04$ .

Le facteur de fatigue de l'aluminium M28 est de 2,0.

Grâce au montage à deux supports et en couches séparées, des contraintes de flexion ne se produisent point sous l'action de la variation de température. La structure ondulée et la suspension libre permettent la dilatation horizontale et verticale exempte de contraintes.

La coaction avec l'ossature portante du bâtiment peut être ignorée, grâce à la flexibilité des jonctions et à la rigidité de l'ossature.



Par conséquence, les murs structuraux sont à dimensionner pour charges extraordinaires dues au coup de vent. Si on prend la plaque ondulée en aluminium, d'une épaisseur de 0,8 mm, en panneaux d'une longueur de 2,0 m et d'une hauteur d'ondulation de 45 mm, produite couramment par l'usine «Fémunkás», la résistance limite du matériau de base est de 1600 kp/cm<sup>2</sup>, le module transversal  $K = 12,4 \text{ cm}^3/\text{m}$ , et le moment d'inertie  $I = 24,8 \text{ cm}^4/\text{m}$ .

Le moment fléchissant engendrée par la charge du vent (ensemble avec l'effet dynamique et de fatigue):

$$M = 90 \times 1,04 \times 2,0 \times 0,8 \times 1,80^2/8 = 60,5 \text{ kgm.}$$

La contrainte de flexion due à la charge du vent:

$$\sigma = 6050/12,4 = 490 \text{ kg/cm}^2$$

Le rapport entre la contrainte limite et la contrainte admissible est:

$$1600/490 > 1,1.$$

La poutrelle horizontale de la squelette du mur est soumise, dans le plan vertical, au poids propre combiné du mur et de la poutrelle qui atteint la valeur extrême, en cas de mouillage de l'isolation thermique, de:

plaque en aluminium ondulée	3 kg/m <sup>2</sup>
isolement thermique (mouillé)	30 kg/m <sup>2</sup>
acier antichoc	16 kg/m <sup>2</sup>
poutrelle	4 kg/m <sup>2</sup>
au total	47 kg/m <sup>2</sup> .

Donc, la charge verticale agissant sur la poutrelle:

$$r = 1,8 \times 47 = 85 \text{ kg/m}^2.$$

La réaction du coup de vent transmis par le mur dans le plan horizontal (pour un coefficient de fatigue du matériau de 1,0):

$$h = 90 \times 1,4 \times 0,8 \times 1,80 = 135 \text{ kg/m}^2.$$

Le moment fléchissant dans le plan vertical:

$$M_v = \frac{85 \cdot 3,0^2}{8} = 95 \text{ kgm.}$$

Le moment fléchissant, agissant dans le plan horizontal:

$$M_h = \frac{135 \cdot 3,0^2}{8} = 151 \text{ mkg.}$$

Les données de l'acier profilé de section fermée de 90 × 50 × 4:

$$K_v = 15,58 \text{ cm}^3$$

$$K_h = 21,56 \text{ cm}^3$$

La contrainte maximale admissible, engendrée au coin, est:

$$\frac{9500}{15,58} + \frac{151}{21,56} = 590 + 710 = 1300 \text{ mkg.}$$

Le rapport de la contrainte limite à la contrainte admissible:

$$1850/1300 > 1,1.$$

L'analyse de la résistance de la construction de mur *proposée* démontre que la résistance de la plaque en aluminium ondulée n'est pas mise en valeur même pour cette faible section, parce que l'espacement des supports se trouve limité par la largeur de 2.0 m des panneaux.

Cependant, si l'on tient compte des profilés prévus par l'entreprise Alutröszt, l'acquisition des panneaux même jusqu'à une longueur de 12.0 m, ne rencontrera pas d'obstacles. Dans ce cas, eu égard à la continuité des panneaux sur plusieurs appuis, l'espacement de ceux-ci pourrait être augmenté jusqu'à  $5 \times 2$  modules = 3.0 m environ.

### Résumé

Le calcul structural des murs extérieurs des ouvrages à la construction légère a soulevé nombre de points de vue qui doivent être considérés à la rédaction du projet; une considération accrue est due au comportement particulier des murs en voile, aux incidences des effets jusqu'à présent ignorés. Cette étude attire l'attention à ces points de vue et, par là, sert de base à l'analyse théorique approfondie de chaque facteur.

Premier assistant Jenő BARTHA	} Budapest XI., Műegyetem rkp. 3
Dr. Sándor KARÁCSON, chargé de cours	