Zeitschrift: IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH Kongressbericht

Band: 8 (1968)

Artikel: Résistance aux actions dynamiques du vent et des séismes

Autor: Sfintesco, D.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-8710

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 08.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

IIIc

Résistance aux actions dynamiques du vent et des séismes

D. SFINTESCO
Directeur des Recherches du CTICM, Puteaux (France)

Introduction

Le développement de la construction de bâtiments de grande hauteur, la tendance vers des formes de plus en plus élancées, l'évolution constante qui se manifeste, tant dans le domaine des matériaux de construction que dans celui des procédés de mise en œuvre, et enfin les exigences toujours croissantes d'une construction économique et rationnelle ont eu pour conséquence un remarquable effort de recherches théoriques et expérimentales dans le but de:

— mieux circonscrire les sollicitations auxquelles sont soumis les ouvrages et mieux définir le comportement de ceux-ci, en serrant la réalité d'aussi près que possible et en tenant compte de façon précise de circonstances autrefois reléguées dans des marges «de sécurité» ou, plus exactement, d'«ignorance»;

— développer des formes constructives, des méthodes de calcul et des techniques de réalisation susceptibles d'améliorer les qualités fonctionnelles et le rendement de la construction;

— obtenir un juste équilibre des impératifs de la sécurité et de l'économie à l'aide de concepts modernes, basés sur des considérations probabilistes, en fonction d'une évaluation scientifique des risques.

Si, en ce qui concerne les sollicitations statiques, l'empirisme des débuts de la construction a été progressivement, mais déjà très largement, abandonné en faveur d'études scientifiquement fondées, les effets des sollicitations dynamiques sur les constructions, notamment celles du vent et des séismes, n'avaient été évalués, jusqu'à ces derniers temps, que de façon plutôt grossière et imprécise, leur prise en compte étant faite par l'introduction de valeurs ou coefficients plus ou moins arbitraires dans les calculs statiques usuels.

Certains aspects du problème des sollicitations dynamiques dues à ces deux catégories de phénomènes et de leurs conséquences sur les constructions en général et sur les bâtiments élevés à ossature métallique en particulier, ont cependant fait l'objet d'importantes recherches théoriques et expérimentales. Certains autres ne sont encore qu'insuffisamment étudiés.

Le but du présent rapport introductif est de marquer les points essentiels du niveau actuel des connaissances et les principaux résultats acquis par les recherches, d'esquisser ensuite les problèmes qu'il semble nécessaire de résoudre ou d'approfondir encore dans l'immédiat et de suggérer ainsi l'orientation qui paraît souhaitable pour les travaux du Congrès et pour la recherche dans ce domaine.

Sollicitations

Vent

Quoique déjà préconisée par Galilée et Newton, la prise en considération de l'action du vent pour le dimensionnement des constructions ne devait prendre une forme concrète et pratique que vers la fin du siècle dernier, les effets de cette action ne devenant sensibles qu'au fur et à mesure de l'apparition de structures légères, élevées et élancées. L'importance du problème de l'action du vent s'est donc manifestée parallèlement au développement de la construction métallique.

Aussi, c'est dès cette époque que deux pionniers de la construction métallique – B. Baker en Grande Bretagne et G. Eiffel en France – poussés par leur intuition et par leur sens du comportement des structures, révélaient deux aspects du problème, essentiels pour le calcul des constructions: le premier prouvait, à l'aide d'une expérimentation fort simple et directe, que l'action d'ensemble sur les grandes surfaces était plus faible que celle mesurée localement, le second constatait par des observations directes sur la «tour de 300 m» que les valeurs maximales des déplacements d'ensemble correspondaient aux poussées d'intensité moyenne, et non aux rafales plus fortes, mais de courte durée.

Depuis, des études théoriques, des essais en soufflerie et des observations directes ont permis d'acquérir des connaissances plus précises sur les divers facteurs entrant en ligne de compte dans le calcul des constructions, tels que la variation des vitesses en fonction de la hauteur, l'influence de la rugosité du sol, le spectre des rafales, l'écart entre les vitesses «instantanées» de celles-ci et les vitesses moyennes sur tel ou tel laps de temps, le rapport entre les variations rapides et les variations lentes des vitesses, la valeur et la distribution des pressions et dépressions sur les faces externes et internes du bâtiment en fonction des angles d'incidence et éventuellement des ouvertures, les effets de masque, etc...

Il n'en reste pas moins – comme l'a fait apparaître le premier Congrès international réuni à ce sujet en 1963 – que la connaissance de l'action de ce phénomène difficile à saisir est encore incomplète et, de plus, souvent entachée des conséquences d'une observation insuffisante, elle-même effectuée à l'aide d'une instrumentation pas toujours satisfaisante et parfois disposée de façon non adéquate. Pour le calcul des structures, il est important de noter l'incertitude qui affecte la prédiction des vitesses de vent, notamment en fonction du site – le plus souvent différent de celui de la station météorologique de référence – ainsi que du fait de l'influence de l'environnement et de bien d'autres facteurs locaux. Dans ces conditions, une précision excessive des calculs serait illusoire et dépourvue de sens.

Il est, par contre, essentiel de se rendre compte dans quelles limites un vent donné est susceptible d'engendrer des sollicitations dynamiques dans les éléments principaux des ossatures de bâtiments à étages.

Schématiquement, le spectre normal de vent comporte des poussées à variation relativement lente, auxquelles se superposent des fluctuations rapides et généralement très irrégulières, accusant, notamment dans les zones de turbulence au voisinage du sol, une distribution aléatoire et éminemment instable. La conséquence en est que l'on peut distinguer l'effet du vent sous un double aspect.

Pour les grands immeubles, le premier concerne l'action d'ensemble qui engendre, dans les éléments porteurs de l'ossature, des efforts répétés ne pouvant devenir alternés que dans la mesure où le bâtiment entier entre en oscillation. Le rythme modéré des variations d'efforts qui entrent en ligne de compte et l'inertie d'ensemble du bâtiment ont cependant pour conséquence de laisser à l'ouvrage le temps de s'adapter comme sous l'effet des charges quasiment statiques.

Le second aspect, qui consiste en une action nettement dynamique, mais localisée et constamment variable, intéresse surtout les éléments directement ou indirectement frappés et dont cette action constitue la principale sollicitation. Toutefois, même pour ces éléments, l'irrégularité – en fréquence et en direction – de cette action peut en limiter les conséquences dynamiques et notamment les risques de résonance.

Il apparaît toutefois que les deux aspects fondamentaux reconnus respectivement par Baker et Eiffel ont été pendant très longtemps ignorés par les règlements. En effet, la réduction des pressions pour les grandes surfaces, actuellement n'apparaît encore sous une forme explicite que dans les règlements les plus évolués. Quant à l'effet signalé par Eiffel, il semble avoir été entièrement perdu de vue jusqu'à ces derniers temps, où il retrouve une expression plus précise dans les tentatives d'étude dynamique des structures.

Il faut toutefois reconnaître que les limites dans lesquelles les effets dynamiques dus au vent peuvent intervenir dans le comportement d'ensemble des ossatures de bâtiments à étages n'ont pas encore été déterminées de façon

incontestable et indépendante d'hypothèses arbitraires. Seul le recours aux expériences directes sur objets réels permettra d'y arriver.

Séismes

Le souci de réaliser des constructions résistant aux séismes, dans les régions sujettes à cette calamité, est aussi ancien que mémoire d'homme, ce qui n'a pas manqué de conduire au développement empirique de formes et de procédés de construction adéquats.

Toutefois, malgré le caractère violent, brutal et souvent catastrophique des secousses sismiques, les observations de ces phénomènes imprévisibles et non reproductibles sont, dans la pluspart des cas, insuffisantes pour permettre une analyse complète a posteriori des conséquences, en fonction des mouvements précis qui en sont la cause. Il a donc fallu recourir principalement aux études théoriques – forcément basées sur des hypothèses simplificatrices – et à des simulations analogiques pour déterminer le comportement des structures et définir les méthodes de calcul.

Le mouvement d'une secousse sismique comporte des déplacements, des vitesses et des accélérations de direction, intensité, durée et séquence très irrégulières. Le mouvement ainsi engendré se déroule suivant une trajectoire spatiale compliquée, pouvant être décomposée suivant les arêtes d'un trièdre. Il est d'usage de négliger dans les calculs la composante verticale, considérée faible par rapport aux charges verticales que la structure doit normalement pouvoir supporter. Cette simplification paraît justifiée en général, mais il n'est pas évident qu'elle le soit dans tous les cas.

L'intensité des secousses sismiques à considérer dans le calcul des constructions est établie, suivant les régions géographiques, en fonction des plus forts séismes enregistrés, ce qui se justifie par le caractère catastrophique du phénomène. Cette intensité est cependant définie, faute de moyens plus scientifiques, à l'aide d'échelles basées sur des observations subjectives et sur les types de dégâts constatés, ces derniers constituant le plus souvent la seule indication précise dont on peut disposer sur les séismes. G. W. Housner a cependant préconisé une méthode, dont le principe avait été suggéré par M. A. Biot, qui consiste à déterminer l'action des secousses sismiques en se référant aux enregistrements fournis par les séismographes.

Dans ces conditions, il faut apporter le plus grand discernement dans l'examen des données utilisées et des hypothèses admises pour l'application des méthodes théoriques de calcul, afin d'éviter qu'elles n'en faussent les résultats.

Du point de vue du mode de sollicitation des bâtiments, les secousses sismiques présentent quelques différences fondamentales par rapport aux actions du vent. Elles sont, en effet, de nature nettement et intégralement dynamique.

De plus, étant introduites par la base même du bâtiment, elles intéressent toujours celui-ci dans sa totalité. Elles n'agissent donc pas comme forces extérieures appliquées au bâtiment mais bien en tant que réactions internes d'inertie par rapport aux mouvements du sol. Elles exercent donc toujours une action d'ensemble, même si celle-ci doit avoir des conséquences localisées dans telle partie ou tel élément constitutif du bâtiment.

Il s'ensuit que si l'inertie des masses s'oppose aux effets dynamiques du vent et en réduit considérablement la portée, cette même inertie intervient dans le sens opposé, en tant que facteur déterminant des effets dynamiques, dans le cas d'une secousse sismique. C'est pourquoi il est recommandé d'éviter tout poids mort inutile dans les bâtiments situés en zone sismique.

Ceci explique d'ailleurs, pour une large part, pourquoi l'évolution vers des bâtiments de plus en plus légers n'enlève rien à l'excellente tenue des ossatures métalliques aux séismes, mais fait surgir des problèmes nouveaux en ce qui concerne leur comportement vis-à-vis du vent.

Réponse du bâtiment

Notion du spectre de réponse

La réponse dynamique d'une structure est fonction directe, tout autant des caractéristiques (statiques et dynamiques) du bâtiment que de la configuration de l'excitation et des propriétés du milieu qui la transmet.

Les premières études sur les effets dynamiques des séismes considéraient des vibrations harmoniques constantes. Cette hypothèse simplifiée, proposée par K. S. Zavriev et A. G. Nazarov, conduisait simplement à éviter les effets de résonance en se référant à la période propre de vibration de la structure.

Des hypothèses plus fidèles à la réalité ont été rendues possibles grâce à la notion de spectre de réponse, énoncée par M. A. Biot et considérablement développée depuis, notamment par G. W. Housner, pour tenir compte de toute l'irrégularité des mouvements que comportent les secousses sismiques.

Le spectre de réponse représente la variation des déplacements relatifs, des vitesses relatives ou des accélérations absolues du système, en fonction de sa période de vibration propre et de l'excitation imposée. Il est défini pour le système le plus simplifié, celui à un seul degré de liberté, mais son application s'étend aux systèmes à plusieurs degrés de liberté, soit en introduisant les expressions intégrales des déplacements, vitesses, accélérations, forces d'inertie et efforts tranchants pour les divers modes de vibration possibles, soit, plus simplement, à l'aide d'un coefficient d'équivalence représentant le rapport de la masse réduite à la masse réelle. On obtient ainsi un spectre équivalent pour la structure considérée.

Ce spectre peut être établi pour toute forme d'excitation, périodique ou

non périodique, soit expérimentalement, à l'aide de modèles dynamiques, soit analytiquement par intégration directe, soit enfin par analogie électrique. Il représente un auxiliaire de tout premier ordre pour l'étude dynamique des structures, car il fournit directement les valeurs des déplacements, des vitesses et des accélérations quels que soient le rythme et la configuration de l'oscillation perturbatrice. Il offre donc le moyen le plus simple de déterminer correctement la résistance et la ductilité nécessaires pour une structure.

Effets de la distribution des masses

La réponse aux secousses sismiques étant proportionnelle à l'inertie des masses, l'importance de la distribution de celles-ci est évidente. Pour un bâtiment de forme symétrique, cette distribution joue uniquement sur la hauteur et intervient ainsi dans la détermination du coefficient sismique qui est à la base des calculs. Il est souhaitable de prévoir une distribution régulière et de ramener autant que possible les masses importantes vers la base du bâtiment en évitant les concentrations de masses (piscines, réservoirs, installations lourdes, etc.) à un niveau élevé. En tout état de cause, il est avantageux de placer le centre de gravité du bâtiment le plus bas possible.

Dans les bâtiments dissymétriques, l'inertie des masses excentrées peut engendrer, lors d'une secousse sismique ou sous l'action du vent, des effets de torsion relativement importants. De tels effets sont toujours à redouter lorsque le centre de gravité et le centre de torsion du bâtiment ne coïncident pas. Il est alors indispensable d'en tenir compte dans les calculs et dans les dispositions constructives prévues.

Amortissement des effets dynamiques

L'amortissement des effets dynamiques par absorption d'énergie constitue un élément capital de la tenue des systèmes réels. En effet, quelle que soit l'origine de l'énergie introduite dans la structure – effets dynamiques du vent ou secousses sismiques – cette énergie doit pouvoir être complètement absorbée, sous peine de provoquer des déformations permanentes excessives ou des dommages encore plus graves.

Or, dans tout système réel, l'énergie provenant d'une sollicitation dynamique – secousse sismique, par exemple – passe, en partie et temporairement, en énergie cinétique de mouvement des masses et en énergie de déformation élastique des éléments structuraux, mais en fin de compte elle doit être entièrement dissipée par frottements internes et, le cas échéant, par des plastifications, dans la mesure où elle n'est pas restituée au sol par interaction entre le bâtiment et celui-ci.

En fait, il est prouvé que toute sollicitation dynamique d'une certaine sévérité risquerait de donner lieu à des moments et des déplacements élastiques bien supérieurs aux valeurs normalement tolérées, si les déformations non élastiques ne devaient pas intervenir.

Ce rôle important de l'absorption d'énergie par ductilité dans la réponse dynamique des ossatures, quels que soient leur hauteur et leur élancement, a été bien mis en lumière par des études récentes, analysant le comportement non linéaire des systèmes à un ou plusieurs degrés de liberté, notamment par G. W. Housner et par G. V. Berg.

Ces études sont particulièrement révélatrices du rôle primordial joué par l'effet de dissipation d'énergie dans la tenue des bâtiments aux sollicitations dynamiques. Leur difficulté majeure réside dans la nécessité de bien connaître les caractéristiques réelles de la structure.

En effet, l'apport d'énergie étant donné, on doit le retrouver à chaque instant, distribué entre le mouvement des masses, les frottements internes, le travail de déformations élastiques et celui de déformations permanentes.

Il apparaît que si la capacité de dissipation d'énergie du système est faible, il peut facilement se produire des efforts excessifs, exigeant un dimensionnement anti-économique. Il y a donc intérêt à concevoir les structures de manière à ce qu'elles puissent absorber une grande quantité d'énergie, non seulement par amortissement normal, mais aussi par déformations plastiques, avant que la ruine ne se produise, quitte à accepter alors, en cas de sollicitations particulièrement fortes, certaines plastifications n'entraînant pas une catastrophe, mais donnant lieu à des désordres limités en conséquence.

Cela permet d'expliquer la bonne tenue, souvent constatée, de structures apparemment faibles, mais ayant une grande capacité d'absorption d'énergie.

L'analyse en régime non linéaire qui, par sa nature même, est particulièrement susceptible de fournir des indications sur la distribution judicieuse des raideurs, a fait apparaître que, dans une ossature de type normal, les déformations non linéaires se produisent de préférence dans les poutres. Bien évidemment, un renforcement de celles-ci entraîne un déplacement du phénomène vers les poteaux.

Il est évident que, dans tous ces processus d'amortissement, il n'intervient aucune discrimination telle que le veut arbitrairement le mode de calcul actuellement en usage, qui ignore les éléments non structuraux: tous les éléments constitutifs du bâtiment – réputés porteurs ou réputés non porteurs – y participent.

Effets de la raideur, des proportions et de la forme du bâtiment

Le comportement dynamique d'un bâtiment vis-à-vis des sollicitations qui lui sont imposées dépend au premier chef de sa raideur et de ses proportions.

Schématiquement, on peut indiquer comme cas limite celui d'un bâtiment absolument rigide et faisant corps avec le sol. Dans ce cas, les efforts dus aux secousses sismiques ou aux poussées du vent résulteraient d'une simple décomposition des forces, sans aucune atténuation. Si, par contre, le bâtiment présente une certaine faculté de déformation, il se produit une absorption d'énergie correspondante, pouvant d'ailleurs être libérée par la suite, ce qui revient à dire que l'on enregistre alors le déphasage d'une fraction plus ou moins importante de la sollicitation, ce qui a en général pour conséquence de réduire la valeur maximale des efforts effectifs. Enfin, dans le cas d'un bâtiment élancé et flexible, soumis à plusieurs cycles consécutifs de sollicitation, les efforts peuvent s'en trouver considérablement amplifiés.

La hauteur du bâtiment intervient directement et indirectement dans le calcul des sollicitations, mais son influence s'efface nettement devant celle de l'élancement lorsqu'il s'agit de déterminer la réponse aux actions dynamiques. Seul l'effet dit «coup de fouet» des derniers étages semble s'aggraver avec la hauteur du bâtiment.

La construction de bâtiments de plus en plus élancés et flexibles dans l'ensemble pose, toutefois, des problèmes nouveaux, tant pour leur tenue aux séismes que pour leur comportement aux actions du vent. De telles structures, ayant une période de vibration propre relativement longue, sont peu sensibles aux oscillations rapides mais peuvent être sujettes à des oscillations d'amplitude considérable, par exemple, sous l'effet de poussées massives de vent. Il est d'ailleurs possible que l'arrêt soudain de celles-ci ait également un tel effet, en raison de la libération d'énergie pouvant en résulter.

Les discontinuités importantes de la forme générale du bâtiment et de sa structure doivent être soigneusement évitées dans les zones sismiques, car elles se refléteraient sur la réponse dynamique du bâtiment et pourraient être une source de désordres importants au niveau intéressé.

Les bâtiments de formes dissymétriques ou complexes, comme ceux en L, en U, en T, en croix ou de toute autre forme ainsi constituée présentent, en général, une bonne stabilité d'ensemble au vent du fait de l'important effet de raidissage mutuel qu'exercent les différentes parties du bâtiment. Par contre, en ce qui concerne les séismes, de tels bâtiments composés par juxtaposition de deux ou plusieurs corps de raideur différente peuvent poser de sérieux problèmes ayant trait aux actions dues à l'inertie des masses. Leur comportement aux actions sismiques est d'ailleurs très difficile à analyser.

Lorsqu'il n'est pas possible d'éviter une telle forme de bâtiments, notamment lorsqu'elle est imposée par des nécessités fonctionnelles ou par la volonté du maître d'ouvrage, il appartient à l'ingénieur de déterminer, dans chaque cas particulier, la nature et la valeur des sollicitations engendrées dans les plans de contact des blocs élémentaires constitutifs du bâtiment, en fonction des réponses individuelles de ceux-ci aux sollicitations dynamiques prévues et de constituer les liaisons en conséquence. La meilleure solution consisterait,

bien évidemment, à construire des corps séparés et suffisamment distants pour qu'ils puissent vibrer de façon indépendante. Si cela n'est pas admis, il faut réaliser des liaisons obligeant l'ensemble à vibrer comme un seul corps.

Influence du système d'ossature et du type de planchers

L'expérience acquise sur bâtiments réels ayant subi des secousses sismiques concerne, le plus souvent, des ossatures classiques à nœuds rigides, mais aussi des ossatures dont la stabilité latérale était assurée par des palées triangulées de contreventement. L'avantage des premières sur les secondes semble évident, quoiqu'il n'y ait pas eu d'études particulières sur ce point. Par contre, l'aptitude de résistance au vent des deux systèmes ne saurait être mise en question.

La nouvelle conception d'ossatures métalliques «en caisson» pour les bâtiments de grande hauteur, qui est à la base de quelques réalisations récentes ou en cours d'exécution des plus remarquables, constitue sans nul doute le type le plus rationnel et le plus efficace de structure pour ce genre de bâtiments quant à la résistance aux actions dynamiques du vent. Elle l'est, très probablement aussi, vis-à-vis des séismes. Bien évidemment, l'expérience pratique est encore à faire avec ce type nouveau de bâtiments, auquel est d'ailleurs consacré un thème spécial du Congrès.

La constitution des planchers intervient dans la stabilité générale de la structure par l'effet de diaphragme, plus ou moins efficace, que ceux-ci exercent en fonction de leur raideur propre, mais elle n'a pas de conséquence majeure sur la raideur latérale intrinsèque de l'ossature, qui dépend principalement de celle des poteaux et de leurs liaisons.

La présence de planchers massifs produit cependant un effet d'amortissement considérable des oscillations, en retardant les accélérations et en augmentant la période de vibration; leur emploi a donc des conséquences favorables pour le comportement du bâtiment vis-à-vis de l'action du vent. Par contre, les effets d'inertie que ces masses exercent au niveau de chaque étage lors d'un séisme vont à l'encontre de ce que l'on doit rechercher dans les zones sismiques. Il semble donc que, dans ces zones, on devrait donner la préférence aux planchers métalliques légers, à condition toutefois qu'une bonne liaison entre toutes les parties constitutives de l'ossature soit assurée de manière que le bâtiment entier réagisse comme un corps unique.

Influence des éléments non structuraux

Un des aspects les plus critiquables des calculs de résistance des bâtiments à étages à ossature métallique est le fait de négliger la présence des éléments dits «non structuraux», notamment des murs et des cloisons. Il peut apparaître

surprenant de vouloir en tenir compte maintenant que l'on emploie des éléments légers, faiblement solidaires de l'ossature et parfois même amovibles, tandis qu'ils ont été négligés lorsque, de par leur constitution, ils devaient jouer un rôle beaucoup plus important dans la rigidité des bâtiments. Cette tendance se justifie toutefois par la recherche d'une exploitation de toutes les ressources de résistance du bâtiment et aussi par les résultats d'expériences récentes sur bâtiments réels.

Ainsi, par exemple, des mesures effectuées par J. W. Bouwkamp sur un immeuble à ossature métallique, dans les différentes phases de sa construction, ont révélé que même des éléments aussi peu consistants que les vitrages pouvaient avoir une influence sensible sur la réponse du bâtiment aux sollicitations latérales, en modifiant sa période de vibration propre. Cela confirme l'opinion de S. Mackey et de l'auteur, qui estiment que, pour les immeubles modernes à ossature en acier, les vitrages constituent une première ligne de défense vis-à-vis des actions dynamiques du vent.

Il est, en tout cas, important d'avoir présent à l'esprit le fait qu'une structure réelle sollicitée dynamiquement se comporte très différemment des oscillateurs linéaires et même de tout système plus ou moins simplifié qu'on lui substitue en vue du calcul.

Pratiquement, la phénoménologie du comportement d'ensemble du bâtiment montre que, même lors d'un fort séisme, les éléments non structuraux jouent un rôle prédominant dans l'amortissement des vibrations imprimées au bâtiment, en absorbant une partie importante de l'énergie introduite pendant une première phase de la réponse, c'est-à-dire tant qu'il s'agit d'amplitudes relativement faibles. Dans une deuxième phase, correspondant à de plus grandes amplitudes, ces éléments sont plus ou moins endommagés, mais continuent néanmoins à exercer une action non négligeable de limitation des mouvements et de dissipation d'énergie. Ce n'est qu'à partir d'une grande amplitude de mouvement que cette action cesse de jouer pratiquement et que les réserves en plasticité de l'ossature interviennent pleinement, constituant ainsi, comme le fait remarquer H. J. Degenkolb, une deuxième ligne de défense.

Cas des structures hybrides

Le contreventement des ossatures métalliques est quelquefois réalisé à l'aide de voiles ou de panneaux préfabriqués massifs.

L'étude, sous l'effet des sollicitations dynamiques, des systèmes ainsi constitués n'a pas encore été entreprise de façon satisfaisante, notamment quant aux conséquences de la différence entre la réponse des plans contreventés et celle des parties non contreventées et quant aux liaisons entre les éléments massifs et la structure métallique. L'intérêt que pourrait présenter ce mode de construction semblerait cependant justifier un effort particulier de recherche

visant notamment les conséquences de la très faible capacité de déformation dans les plans ainsi contreventés.

Il est, en effet, établi qu'à chaque niveau la distribution des sollicitations horizontales sur les éléments verticaux d'une structure est proportionnelle aux raideurs de ces éléments. Un élément de rigidité, constitué d'un matériau à résistance spécifique inférieure à celle des autres éléments, peut alors représenter en fait un point faible, car s'il est sollicité par des efforts en rapport avec sa raideur, la résistance nécessaire pour bien supporter cette sollicitation peut lui faire défaut. Des mécomptes constatés lors des divers séismes le prouvent.

Dans certains pays, il est d'usage d'assurer la stabilité latérale au vent au moyen d'un noyau central en béton armé, l'ossature métallique n'ayant alors à supporter que des charges verticales. L'examen des considérations économiques ou de sécurité anti-incendie pouvant justifier de telles solutions ne fait pas l'objet du présent rapport, il y a cependant lieu de remarquer qu'une détermination plus précise des effets du vent, permettant un dimensionnement rationnel de la structure métallique, pourrait limiter le nombre de cas dans lesquels on est amené à envisager une telle solution hybride.

En ce qui concerne les bâtiments situés dans des zones sismiques, la différence considérable entre la réponse de la partie rigide et celle de la partie métallique du bâtiment aux sollicitations dynamiques peut provoquer des efforts très importants dans les plans de contact entre les deux parties du système et donner lieu, de ce fait, à des désordres dans les liaisons entre la structure métallique et le noyau en béton.

La littérature technique ne révèle pas, à notre connaissance, une expérience pratique suffisante de la tenue aux séismes des bâtiments de ce type, tandis que l'analyse théorique rigoureuse de leur comportement s'avère difficile.

Comportement du matériau et des éléments structuraux

Propriétés essentielles du matériau acier

Les propriétés essentielles requises du matériau en vue de la bonne tenue des ossatures aux sollicitations dynamiques – qu'il s'agisse du vent ou des séismes – peuvent être énoncées comme suit:

— élasticité et ductilité, qualités nécessaires pour permettre une flexibilité élastique et une adaptation élasto-plastique suffisantes afin d'assurer un taux raisonnable d'absorption d'énergie;

— bonne résistance aux sollicitations alternées, impliquant des contraintes du même ordre de grandeur dans les deux sens et exigeant par conséquent une résistance sensiblement égale en traction et en compression;

— bonne résistance aux sollicitations de fatigue à faible nombre de cycles.

Ces propriétés étant par excellence réunies dans l'acier de construction,

celui-ci s'avère comme particulièrement apte pour la réalisation des ossatures ayant à subir les actions dynamiques du vent et des séismes.

Cependant, la plupart des études sur la fatigue des aciers, menées sur des aciers des nuances les plus diverses, l'ont été de préférence sous l'aspect des actions à très grand nombre de cycles. Les recherches, plus récentes mais moins nombreuses, sur leur tenue sous l'effet d'un faible nombre de cycles ne peuvent pas être considérées comme ayant épuisé le problème, notamment dans le domaine élasto-plastique. Or, c'est bien en cela que réside l'un des problèmes fondamentaux pour le calcul sismique des ossatures métalliques.

Par contre, malgré le caractère répétitif et réversible de l'action du vent, il ne semble pas – sauf preuve du contraire – que la fatigue doive intervenir dans le calcul des éléments porteurs de l'ossature des bâtiments à étages de type courant, en raison notamment des faibles valeurs de contraintes réelles sur lesquelles elle peut jouer.

Un tel critère serait toutefois à considérer pour des éléments essentiellement soumis aux fluctuations du vent et principalement dimensionnés pour y résister, par exemple les éléments secondaires de façades ou certaines barres de contreventement.

Comportement des poutres et des poteaux

Nous avons déjà indiqué le rôle prédominant joué par les poutres dans le comportement non linéaire des ossatures métalliques de type normal. L'analyse de ce comportement revêt donc une importance de premier plan.

Un tel problème ne saurait être résolu valablement sans une évidence expérimentale et, cependant, il n'y a eu que peu de recherches sur ce point. La plus révélatrice et la mieux adaptée au but est sans doute celle menée par E. P. Popov, qui a montré que le seuil de résistance d'un tel élément est déterminé par le voilement local des ailes, sous l'effet d'un nombre de cycles fonction de la contrainte atteinte à chaque fois.

Il apparaît, en effet, que sous ce type de sollicitation, les précautions contre le voilement des ailes sont d'une plus grande importance que la résistance à la fatigue du matériau en soi, ce voilement se trouvant favorisé dès qu'un cycle antérieur a pu donner lieu à une légère déformation permanente.

Ce phénomène de cumul de déformations est susceptible de constituer une limite au degré d'absorption d'énergie que l'on veut, par ailleurs, rendre aussi élevé que possible aux fins d'un dimensionnement économique.

Dans un système de cadres étagés à nœuds rigides, le déplacement latéral de l'ossature sous l'effet de sollicitations transversales résulte de la raideur des poteaux et de celle de leurs nœuds d'attache. Or, ce déplacement latéral étant un facteur déterminant pour la réponse du bâtiment aux sollicitations dynamiques, son importance est évidente. En tant qu'éléments à la fois fléchis et comprimés, leur comportement s'apparente à celui des poutres, mais leur

capacité d'absorption d'énergie de vibration dépend largement de la charge axiale qui leur est appliquée.

Comportement des assemblages

Une ossature étant constituée d'éléments assemblés entre eux, il est indispensable de bien connaître la tenue des assemblages. Ceux-ci représentent des points de discontinuité par rapport aux poutres et aux poteaux de section constante, leur comportement vis-à-vis des sollicitations dynamiques exige donc un soin particulier. Or, cette étude s'avère inextricable sur le plan théorique, en raison tant de la complexité des formes, qui rend difficile la détermination rigoureuse des flux de contraintes, que de la présence des divers moyens d'assemblage (soudures, boulons, rivets) avec leurs caractéristiques propres et les contraintes parasites auxquelles ils peuvent donner lieu.

Là encore, les essais de E. P. Popov, effectués sur divers types d'assemblages soudés ou boulonnés, soumis à des sollicitations alternées donnant lieu à des allongements allant jusqu'à 1½ ou 2%, offrent des résultats particulièrement clairs et significatifs, pouvant servir de base aux études du comportement des structures réelles. Ils permettent, évidemment, aussi d'effectuer une meilleure approche de la réalité en introduisant leurs résultats dans les systèmes simplifiés que l'on prend comme base pour les études théoriques.

En fait, ces expériences font ressortir pour tous les types d'assemblages essayés un comportement très favorable, reflété par une courbe d'hystérésis d'une stabilité remarquable, ce qui prouve que – dans les limites normalement prévues pour ces sollicitations – on peut compter sur une absorption d'énergie pratiquement constante pour chacun des cycles successifs.

Ces recherches demandent encore à être complétées et exploitées, mais il est d'ores et déjà possible d'en dégager la conclusion générale que, pour les ossatures métalliques sujettes aux actions dynamiques, il suffit de prévoir des assemblages normaux, bien conçus et correctement réalisés, qu'ils soient soudés ou boulonnés, et surtout sans recourir à des dispositions spéciales plus compliquées, qui seraient non seulement inutiles, mais pourraient éventuellement s'avérer défavorables. En effet, les constatations faites lors des divers séismes ont montré que, dans la mesure où il y a eu des désordres dans les assemblages, cela était dû à des conceptions ou réalisations défectueuses. Il est, par exemple, souhaitable d'éviter les dispositions qui impliquent des changements brusques de la distribution des contraintes dans la section ou des concentrations excessives de contraintes, susceptibles de réduire la résistance de l'assemblage aux sollicitations alternées en zone élasto-plastique.

En tout cas, les considérations de sécurité exigent que les assemblages soient conçus et réalisés de manière que leur ruine ne puisse pas intervenir avant celle des éléments assemblés.

Comportement des ossatures et des bâtiments complets

Effets du vent

Des études très poussées faites à l'aide d'essais en soufflerie sur modèles réduits ont permis d'enrichir énormément les connaissances relatives à la distribution des pressions sur les faces des bâtiments ainsi qu'à certaines actions locales, en fonction d'une vitesse déterminée du vent, et ont permis de vérifier l'application des lois de l'aérodynamique à ce domaine particulier. Dans les souffleries modernes, il est même possible de reproduire certaines conditions environnantes d'un bâtiment particulier étudié, afin d'obtenir une image aussi fidèle que possible des conditions réelles de turbulence.

Des enregistrements effectués sur bâtiments réels ont cependant révélé des différences importantes d'intensité et de distribution des pressions par rapport aux résultats obtenus sur modèles réduits, ce qui prouve la nécessité de compléter ainsi les recherches faites en soufflerie. De telles mesures, insuffisamment effectuées dans le passé, sont actuellement entreprises notamment par C. W. Newberry.

Toutefois, ces recherches ne concernent que la première partie du problème. La seconde, le comportement effectif de la structure, ne saurait être réalisée sur modèles réduits, qui ne peuvent pas reproduire fidèlement les caractéristiques de réaction des bâtiments réels. Seules des mesures sur de tels bâtiments sont susceptibles de fournir une réponse valable aux diverses questions qui se posent à leur sujet. Cependant, à l'exception de quelques recherches déjà anciennes, ce domaine est resté inexploré à ce jour.

Une étude remarquable a été entreprise au Canada par R. Crawford et H. S. Ward, sur un bâtiment de 18 étages à ossature métallique, à l'aide de séismomètres électromagnétiques et enregistrement sur bande magnétique des vibrations dues à l'action du vent. Quoiqu'il s'agisse seulement d'une tentative de vérification des résultats obtenus quant aux fréquences propres sur des modèles mathématiques et malgré la présence d'un noyau central en construction métallique et panneaux en béton, qui enlève en partie la signification des résultats pour le but qui nous concerne, cette recherche n'a pas manqué de permettre quelques observations intéressantes.

Il est ainsi apparu que les vents forts ont tendance à provoquer des vibrations suivant le premier mode, tandis que les vents faibles excitent davantage les modes supérieurs. L'auteur estime que cela traduit bien nos connaissances sur le spectre du vent.

Effets des séismes

La détermination rigoureusement exacte du comportement dynamique d'une structure réelle est une impossibilité pratique. En fait, ce comportement est

déterminé par les fréquences propres correspondant aux divers modes de vibration de la structure et se trouve, de surcroît, affecté par l'effet d'amortissement dû aux caractéristiques technologiques de celle-ci.

Le calcul exact des fréquences propres d'un système à n degrés de liberté, impliquant la détermination des ordonnées de tous les modes de vibration, est hors de question pour le praticien. Or, déjà pour le système le plus simple – la poutre sur deux appuis – on a $n = \infty$.

Il est cependant possible de se référer à des systèmes «équivalents» très simplifiés, sans s'écarter outre mesure de la réalité. Une telle simplification revient à considérer les masses du système comme étant concentrées en certains points et à appliquer les sollicitations – convenablement modifiées – en ces mêmes points. Bien évidemment, le choix du système simplifié exige un sens très sûr du comportement réel de l'ossature, afin d'assurer une réplique suffisamment fidèle.

Des méthodes approchées, donnant avec une précision raisonnable la fréquence fondamentale correspondant au premier mode de vibration, ont été développées par Dunkerley et par Rayleigh. Cette dernière, fondée sur le principe de la conservation d'énergie, est appliquée de préférence avec les simplifications apportées par J. A. Blume et par M. Ifrim. Il est à noter que la méthode Dunkerley donne toujours des valeurs inférieures, celle de Rayleigh des valeurs supérieures aux valeurs exactes, de sorte qu'on peut encadrer celles-ci en appliquant les deux méthodes. En partant de la matrice des déplacements, S. A. Bernstein a établi une «fonction spectrale» permettant de déterminer deux valeurs qui encadrent la fréquence cherchée. Enfin, la méthode itérative convergente de Vianello-Stodola, devenue classique, permet de déterminer la déformée du système par approximations successives en partant d'une déformée arbitrairement choisie et conduit ainsi à des résultats aussi exacts que l'on désire.

Toutefois, il faut se rendre compte que l'exactitude de ces calculs de la fréquence propre n'est en fait qu'une simple illusion, car elle ne concerne que les moyens mathématiques utilisés. Aussi, divers chercheurs plus réalistes ont été amenés à proposer des formules empiriques simples, s'appuyant sur des résultats expérimentaux ou sur des considérations théoriques, pour exprimer la fréquence propre des structures.

Les formules proposées respectivement par T. Taniguchi, par le U.S. Coast and Geodetic Survey et par E. Rosenblueth donnent la valeur de la fréquence propre correspondant au premier mode de vibration, en fonction du nombre d'étages. Celles de I. L. Korchinski, de F. P. Ulrich et D. S. Carder et de M. Takeuchi se réfèrent à la hauteur des bâtiments tandis que la formule du Joint Committee ASCE-SEA, plus connue sous le nom de «formule de San Francisco», se réfère à cette même hauteur, rapportée à la racine carrée de la largeur du bâtiment dans le sens des vibrations considérées.

En application de la théorie générale des vibrations et du principe de d'Alembert et en introduisant quelques hypothèses simplificatrices – masses

concentrées à chaque étage, poutres infiniment rigides – M. G. Salvadori a établi une formule donnant les fréquences propres pour tous les modes de vibration d'un bâtiment à étages. Une formule similaire est proposée par R. G. Merritt et G. W. Housner.

Partant de la notion du spectre des secousses sismiques et de celle des fréquences propres du bâtiment, de très importantes recherches ont été entreprises, notamment à l'aide de simulations analogiques, pour éclairer les divers aspects du comportement dynamique des structures.

Diverses méthodes ont été développées suivant des hypothèses variées quant aux types de modèles simplifiés des ossatures et quant aux conditions de comportement en zone non linéaire. Parmi celles-ci, l'une des plus générales est celle préconisée par N. M. Newmark.

En dehors des études expérimentales mentionnées par ailleurs et portant sur la tenue d'éléments isolés et de leurs assemblages, des essais ont été entrepris, notamment au Japon et aux U.S.A., sur des bâtiments réels soumis à une excitation par pulsateurs installés à divers niveaux. Les renseignements ainsi fournis concernent en premier lieu la détermination des fréquences propres des bâtiments réels. Par leur nombre, ils ont déjà une certaine valeur statistique.

Quelques essais, très limités en nombre et en portée, ont même été tentés à l'aide d'explosions imprimant des secousses au sol.

Ces recherches, si utiles qu'elles puissent être, ne sauraient cependant pas remplacer les observations – encore manquantes – des bâtiments au cours même de séismes réels.

Enseignements résultant de l'expérience pratique

Vent

Les enseignements de l'expérience pratique ont constitué, pendant de longs siècles, la seule source d'information pour la conception et le dimensionnement des constructions. Pour concilier la hardiesse et la sécurité, il fallait alors procéder à l'instar du réglage du tir d'artillerie, en visant d'abord un peu en deçà et un peu au-delà de la limite de résistance.

Aujourd'hui encore, la pratique constitue la source d'information valable en dernier ressort, pour confirmer ou infirmer les hypothèses des calculs et la validité des réalisations. Les cas les plus instructifs sont alors ceux qui marquent des désordres, voire un accident.

L'information que l'on peut recueillir ainsi sur la stabilité d'ensemble des bâtiments qui nous concernent ici est toutefois bien faible, puisqu'il n'y a aucun exemple d'effondrement ou de désordres notables dus au vent dans ce type de bâtiments. C'est la preuve que les calculs actuels placent en sécurité. Mais de combien?

Les moyens scientifiques dont on dispose aujourd'hui doivent dispenser de «viser au-delà» de la limite de résistance et permettre néanmoins de réduire la marge de sécurité si les recherches devaient prouver qu'elle est excessive.

Séismes

Malgré les nombreuses recherches entreprises sur le plan théorique, qui ont permis d'explorer les principaux aspects du problème, la sécurité des constructions vis-à-vis des séismes est encore essentiellement basée sur des considérations empiriques, en raison non seulement de la connaissance insuffisante des sollicitations et de la complexité de la réponse du bâtiment, mais aussi et surtout en raison de l'impossibilité d'établir une relation précise de cause à effet entre les deux, pour la plupart des séismes connus, faute de renseignements indispensables.

Les constatations faites à la suite des séismes ont cependant permis de dégager la conclusion que la sécurité des constructions réside encore ailleurs que dans les calculs conventionnels: dans la conception et la réalisation de celles-ci.

Ainsi, une condition essentielle pour assurer la bonne tenue des bâtiments aux séismes consiste à bien lier ensemble tous ses éléments constitutifs. Cette constatation revient constamment dans tous les cas examinés, où l'on rencontre souvent des bâtiments ne répondant pas aux conditions de calculs et qui ont cependant fort bien résisté. L'auteur a pu d'ailleurs faire personnellement cette constatation lors du séisme catastrophique de Bucarest, dont il a été témoin en 1940 et dont il a eu à analyser les conséquences, car aucun bâtiment à ossature métallique n'a subi alors de dommages importants, quoique le calcul des ossatures n'ait pas été fait pour une telle sollicitation.

Quelques séismes enregistrés ces derniers temps ont fait l'objet d'études portant sur leurs conséquences et mettant en lumière le comportement spécifique des bâtiments suivant les modes de construction et les matériaux employés et, tout autant, suivant les conditions de leur réalisation. Si ces études ne pouvaient nullement renseigner sur la réponse d'un bâtiment à une sollicitation donnée, elles offraient du moins de précieux éléments relatifs à la conception et la réalisation adéquate des bâtiments en zones sismiques.

Calcul et dimensionnement

Effets du vent: examen critique des conditions actuelles du calcul

Tout calcul d'une construction comporte obligatoirement deux parties fondamentales, qui sont d'ailleurs complémentaires: la détermination des solli-

citations et, par référence à celles-ci, la vérification de la structure. Nous verrons brièvement comment se présentent ces deux points en ce qui concerne le calcul des bâtiments à étages à ossature métallique sous l'action du vent.

Un examen critique des données de base prévues dans la règlementation des divers pays fait apparaître ces données comme ayant souvent un caractère plus ou moins arbitraire et manquant par conséquent d'une signification probabiliste précise, indispensable pour permettre d'opérer un dimensionnement rationnel. En effet, aucune mesure tendant à réaliser un tel dimensionnement dans le sens d'une sécurité bien contrôlée ne saurait atteindre pleinement son but, tant que l'on ne disposera pas, pour l'action du vent, de données fondées sur des observations suffisantes et définies suivant des critères probabilistes précis et uniformes sur le plan international

Quant aux conditions classiques du calcul des ossatures au vent, on doit constater qu'elles sont basées sur une série d'hypothèses simplificatrices: introduction des sollicitations sous forme de charges statiques agissant sur une ossature idéale à comportement purement élastique, bâtiment dépourvu d'inertie, éléments non structuraux présents pour la détermination des charges et absents pour la résistance, etc... Il est possible que l'une ou l'autre de ces hypothèses soit pratiquement justifiée, mais il n'y a pas de preuve incontestable du bien-fondé d'un tel calcul.

Toutefois, malgré ces lacunes dans les données de base et dans le mode fondamental de calcul, les règlements les plus récents n'ont pas manqué de suivre les progrès enregistrés dans les connaissances aérodynamiques et météorologiques.

Ainsi, on a vu apparaître les notions de «vent normal» et «vent exceptionnel» qui, si elles correspondaient effectivement à des probabilités déterminées, constitueraient un sérieux pas en avant dans le sens que nous venons d'indiquer.

La distribution irrégulière du vent sur les grandes surfaces trouve son expression dans un coefficient minorateur, fonction des dimensions de la surface intéressée.

Enfin, les variations rapides des pressions, constituant une action dynamique caractérisée, sont exprimées par un coefficient majorateur, que l'on introduit dans les calculs statiques traditionnels des éléments qui en sont affectés. Certains règlements ont étendu récemment l'application de ce coefficient aux calculs de stabilité d'ensemble des bâtiments à étages. Toutefois, le bien-fondé de cette mesure ne semble pas avoir été prouvé.

De toute manière, le coefficient de majoration dynamique ne doit être appliqué qu'à des valeurs de pressions correspondant à une moyenne sur un laps de temps déterminé.

Effets des séismes: Examen critique des bases du calcul

Dans le cas des bâtiments à étages, la détermination des charges verticales permanentes ou de service ne présente pas de difficulté. Celle des effets du vent, quoiqu'encore entachée d'insuffisances, doit pouvoir être résolue, pourvu que l'on entreprenne les recherches qui s'imposent. Pour les séismes par contre, vu leur nature et leur mode d'occurrence, il est difficile d'envisager, du moins dans l'état actuel des connaissances, l'obtention de renseignements précis, faisant ressortir clairement les relations de cause à effet et ayant une valeur statistique suffisante pour permettre de «serrer la réalité de près» dans les prévisions règlementaires.

Par ailleurs, le calcul et la réalisation des constructions érigées en zones sismiques doivent toujours prémunir, avec une sécurité suffisante, contre toute conséquence catastrophique d'un séisme éventuel.

Quant aux calculs de vérification des structures, il faut remarquer qu'ils sont pratiqués à l'aide d'un coefficient sismique censé tenir compte de tous les éléments en présence (degré de séismicité, nature du sol, interaction de celui-ci et du bâtiment, distribution des masses, etc.) mais dont la valeur est en fait assez arbitraire et sujette à caution. Il est certain que la conception générale de l'ossature, celle des assemblages et, dans une égale mesure, la nature et le mode d'attache des éléments réputés non porteurs représentent autant de facteurs non pris en considération dans l'évaluation du coefficient sismique, mais qui exercent sur la tenue des bâtiments une influence qui est loin d'être négligeable.

Introduction des notions probabilistes

Le calcul dynamique d'une structure fait appel, tant aux caractéristiques de l'excitation qui lui est appliquée qu'à celles de la structure même, qui en déterminent la réponse.

Le caractère essentiellement aléatoire des paramètres définissant les phénomènes telluriques et éoliens et la complexité des facteurs intervenant dans le comportement des structures vis-à-vis des actions de ces phénomènes désignent par excellence le recours aux méthodes probabilistes pour le calcul dynamique des structures. On constate toutefois que ce secteur a pris du retard par rapport à l'orientation, maintenant générale, du calcul des constructions vers les méthodes probabilistes.

L'explication en est sans doute à chercher, d'une part, dans l'insuffisance des données statistiques indispensables relatives aux sollicitations et, d'autre part, dans la difficulté de circonscrire statistiquement, de façon suffisamment serrée, un problème aussi compliqué que celui du comportement dynamique des structures. Cependant, dans un tel cas, les méthodes probabilistes offrent, en fin de compte, le seul moyen d'effectuer une approche convenable de la

réalité. Par ailleurs, les méthodes de la statistique mathématique permettent de pallier, dans une certaine mesure, les carences des données, offrant le moyen d'obtenir une certaine précision à partir d'un nombre convenable d'indications judicieusement choisies.

En fait, le problème qui se pose à l'ingénieur est celui d'atteindre une sécurité convenable tout en tenant compte des impératifs économiques. Pour concilier ces deux considérations opposées, il est nécessaire de trouver une relation entre les sollicitations définies dans le sens probabiliste et le comportement de la structure, par référence à un critère de ruine déterminé, le but final étant d'obtenir un degré de sécurité correspondant à la nature des sollicitations et aux risques admissibles pour la construction.

De remarquables contributions à la solution de ce problème pour les sollicitations d'origine sismique sont dues notamment à E. Rosenblueth, M. F. Barstein, V. V. Bolotine, N. M. Newmark et H. Tajimi. Une certaine approche du même problème pour le vent a été esquissée par A. G. Davenport.

Toutefois, la question est encore loin d'être résolue, non pas de la faute des chercheurs, mais en raison de l'absence de données statistiques susceptibles de fournir une base valable aux calculs.

Degrés de sécurité

Un calcul fondé sur des considérations probabilistes doit conduire, en fonction des données du problème, à un degré de sécurité bien défini vis-à-vis de chaque catégorie de risque, compte tenu de sa probabilité d'occurrence et de la gravité de ses conséquences possibles.

Pour les bâtiments dont nous traitons, on peut classer schématiquement les risques en quatre catégories:

— sensation d'inconfort pour les personnes se trouvant à l'intérieur du bâtiment,

— désordres mineurs, entraînant des dégâts matériels limités, notamment dans les éléments secondaires et non structuraux,

— dégâts importants dans les éléments secondaires et non structuraux et désordres éventuels dans la structure principale, mais n'impliquant pratiquement pas d'accidents de personnes,

— désordres importants dans la structure principale, susceptibles d'entraîner la ruine partielle ou totale du bâtiment par instabilité statique ou dynamique, par affaissement plastique ou par fatigue risquant de provoquer des accidents de personnes.

Lorsqu'il s'agit du vent, le calcul doit prémunir contre tous ces risques dans le cas des vitesses considérées normales, dont la fréquence est relativement grande, mais peut tolérer une certaine perceptibilité des mouvements engendrés par un vent exceptionnellement fort.

Quant aux séismes, dont la fréquence est, en tout état de cause, beaucoup plus faible que celle du vent et qui ont, par définition et de par leur nature, un caractère de calamité, il est loisible de tolérer des dégâts matériels peu importants pour un séisme de faible intensité par rapport à la zone sismique considérée et des désordres d'une certaine importance pour un séisme relativement fort, tout cela en fonction d'une étude économique menée dans un esprit similaire à celui d'un contrat d'assurance, qui doit décider d'accepter ou non délibérément tel ou tel risque plutôt qu'un prix de construction plus élevé. Il s'agit donc, somme toute, de considérations économiques basées sur des données techniques.

Enfin, le risque de perte de vies humaines par effondrement doit toujours être écarté, en fonction de toutes les sollicitations raisonnablement prévisibles.

Etudes susceptibles de contribuer à l'avancement des connaissances

Effets de l'action du vent

Les effets de l'action d'ensemble du vent sur les bâtiments à étages sont déterminés, dans la pratique actuelle, suivant des hypothèses insuffisamment contrôlées. Il est indispensable d'effectuer des observations sur des bâtiments réels, comportant des mesures de déplacements, d'accélérations et de contraintes avec enregistrement simultané des vitesses et de la direction du vent, afin de déterminer la corrélation réelle aussi bien entre leurs valeurs qu'entre leurs spectres. Cette recherche devrait prendre un caractère statistique, en s'étendant sur un laps de temps suffisant et en portant sur plusieurs bâtiments de caractéristiques différentes, en vue de constituer une base suffisante pour la réglementation et, plus particulièrement, pour contrôler le bien-fondé de l'application d'un coefficient dynamique à l'action d'ensemble.

Une attention particulière doit être accordée à la sensibilité d'ensemble du bâtiment aux rafales, afin d'en déterminer le seuil en fonction de la durée de celles-ci et de vérifier la validité des coefficients réducteurs pour grandes surfaces.

Pour cela, il est nécessaire d'entreprendre des recherches systématiques, par expérimentation directe sur bâtiments réels, afin de mieux définir la relation entre la durée d'action des rafales et leurs conséquences possibles sur les structures, cette relation importante étant encore très mal connue et, de ce fait, insuffisamment prise en considération dans les règles actuelles de calcul.

Les actions locales du vent peuvent donner lieu, dans certaines zones des façades, à des pressions ou des dépressions atteignant un multiple de la valeur de la pression dynamique de base.

Une étude à l'aide d'essais en soufflerie corroborée par des mesures sur bâtiments réels pourrait avoir pour objet l'analyse systématique des pressions

locales dans les parties les plus sollicitées des façades de bâtiments, en fonction de la forme de ceux-ci. Des formes favorables, tant pour l'ensemble que pour la constitution des arêtes, pourraient être préconisées.

Effets des séismes

Si malgré toutes les recherches entreprises en la matière, la construction des bâtiments destinés à résister aux séismes se fait encore suivant des critères largement empiriques, la cause principale en est, sans aucune doute, la carence de renseignements sur les séismes enregistrés à ce jour. Sauf quelques rares exceptions, il n'y a pas eu d'enregistrements permettant d'interpréter valablement les dégâts constatés lors des divers séismes, même récents. Or, seule une confrontation directe de sollicitations connues et de leurs effets pourrait être concluante.

Le caractère imprévisible des phénomènes telluriques ne permet pas d'envisager une observation très systématique, celle-ci étant toujours fonction du hasard de la présence d'appareils enregistreurs installés sur les lieux d'un prochain séisme.

Des installations comportant une instrumentation susceptible d'enregistrer les caractéristiques des secousses sismiques éventuelles en même temps que celles de la réponse des structures, ont été récemment montées sur quelques bâtiments à Los Angeles, San Francisco, Mexico City et Tokyo. Malgré le coût élevé de ces installations, par rapport à la faible probabilité d'avoir à enregistrer un séisme à l'endroit choisi, il semble concevable de créer, par accord international, un véritable réseau d'observations en équipant ainsi un plus grand nombre de bâtiments à ossatures métalliques situés dans des régions notoirement sujettes aux séismes. Les chances d'obtenir dans un délai raisonnable les renseignements qui font encore défaut sur la réponse d'un bâtiment réel à un séisme bien défini seraient considérablement accrues. Une partie de l'instrumentation prévue pourrait d'ailleurs également servir à l'observation des effets du vent sur ces mêmes bâtiments.

Sans attendre la réalisation d'une action aussi importante, quoique nullement utopique, on pourrait chercher, dès à présent, à exploiter au maximum les renseignements existants. Certains séismes récents ont fait l'objet d'études descriptives fort instructives malgré l'absence d'enregistrements des secousses correspondantes. Or, une étude générale, comportant un très grand nombre d'observations, mêmes incomplètes, pourrait sans doute permettre de dégager des enseignements pratiques très utiles.

Il serait donc souhaitable de procéder à une telle étude de synthèse de toutes les constatations qui ont pu être faites dans le monde, sinon pendant, du moins après, les séismes connus.

Perfectionnement des méthodes de calcul

Les méthodes de calcul dynamique des structures ont subi, au cours des dernières années, un développement spectaculaire dans le sens de l'analyse précise des phénomènes visés. Toutefois, cette précision est plus ou moins entachée d'incertitude, du fait des hypothèses simplificatrices auxquelles ces méthodes doivent faire appel. De plus, ces méthodes négligent certains paramètres dont l'influence est cependant considérable, ou bien n'en tiennent compte que de manière trop imprécise.

Le perfectionnement des méthodes de calcul doit avoir pour objectif une approche aussi fidèle que possible du comportement réel de l'ouvrage considéré, compte tenu non seulement du type d'ossature, de la distribution des masses et de celle des raideurs, mais aussi des caractéristiques intrinsèques du matériau constitutif de l'ossature, du comportement dynamique des éléments structuraux et de leurs assemblages et, bien entendu, des conséquences de la présence des éléments non structuraux sur le comportement de l'ensemble.

Les méthodes de calcul doivent être développées en accord avec les résultats des recherches entreprises à l'aide de simulations analogiques et avec un large emploi des possibilités offertes par les calculateurs digitaux. Les études sur calculateurs hybrides, permettant de se référer à tout séisme réel enregistré ou à tout séisme fictif conçu «sur mesures» et de prendre en considération tous les paramètres voulus pourvu qu'ils soient bien définis, ouvrent des perspectives très intéressantes pour ces recherches.

Il n'en reste pas moins qu'en vue des applications pratiques, les méthodes de calcul devront toujours aboutir à des formes d'une simplicité compatible avec les exigences de la pratique courante dans les bureaux d'études.

Evidemment, tout mode de calcul ainsi établi devra être confronté, le plus largement possible, avec des observations directes faites sur bâtiments réels, sources d'informations indiscutables en dernier ressort.

Exploitation des réserves de résistance en zone non linéaire

Malgré l'importance que revêt l'absorption d'énergie qui se produit avant la limite de résistance de l'ossature en zone non linéaire, le comportement des cadres à étages soumis à des sollicitations cycliques n'a pas été étudié expérimentalement dans cette zone. De telles études devraient être entreprises, entre autres, afin de vérifier l'évolution des taux d'absorption d'énergie en fonction de celle des sollicitations, de déterminer l'effet des déformations plastiques successives lors des renversements d'efforts et de constater les phénomènes de raffermissement pouvant se produire et influer sur la résistance.

Les résultats de ces recherches devraient fournir une base pour la prise en

considération de cette importante réserve de sécurité dans les règles de calcul sismique des constructions.

D'ailleurs, même dans l'état actuel des connaissances, ces règles sont en grave défaut vis-à-vis de cet aspect du problème, puisque le coefficient sismique ne tient pas compte de façon satisfaisante de la capacité d'absorption d'énergie inhérente et caractéristique de chaque mode de construction. Les règlements devraient cependant, comme le fait remarquer G. V. Berg, «récompenser» la faculté d'absorption d'énergie et en pénaliser la carence.

Une recherche expérimentale pourrait être entreprise en laboratoire sur des portiques en acier munis de divers types de remplissages ou de revêtements afin d'en déterminer l'influence sur le comportement aux sollicitations dynamiques.

Assemblages

Quoiqu'il soit reconnu et expérimentalement prouvé que tout assemblage métallique bien conçu, normalement constitué et convenablement réalisé est apte à supporter sans dommage des sollicitations dynamiques en rapport avec la résistance de l'ossature, il semble opportun de procéder à des études systématiques plus poussées afin d'explorer les limites caractéristiques de résistance de chacun d'eux, d'en faire un classement et éventuellement de développer de nouveaux types répondant au mieux aux qualités requises.

Ces études devraient viser tous les moyens et procédés d'assemblage en usage et considérer distinctement les pièces de dimensions modérées et à faibles épaisseurs, et celles de grandes dimensions et à fortes épaisseurs.

Une recherche particulière devrait être consacrée au comportement spécifique des assemblages par boulons à haute résistance, procédé en plein développement et dont la bonne tenue au desserrage a déjà été prouvée pour d'autres cas de sollicitations.

Propriétés des matériaux et des éléments de construction

Les qualités primordiales exigées du métal pour le type de sollicitations qui nous concernent – ductilité, résistance aux efforts alternés à petit nombre de cycles et, pour certains éléments, résistance à la fatigue – ont déjà été beaucoup étudiées pour l'acier doux de construction.

L'emploi de nouvelles nuances d'acier à caractéristiques mécaniques supérieures, qui commence à être pratiqué dans la construction des ossatures de bâtiments élevés, incite à procéder à des recherches devant établir dans quelle mesure ces qualités se retrouvent dans les nouveaux aciers.

Les phénomènes d'instabilité pouvant se produire en zone élasto-plastique sous l'effet de sollicitations répétées ou alternées ont déjà fait l'objet d'études.

Celles-ci ne semblent pas avoir épuisé le sujet, vu sous l'angle du comportement des ossatures faisant l'objet du présent rapport. L'un des points à clarifier concerne l'influence du niveau de sollicitation statique des poteaux par les charges verticales sur la résistance de ces derniers aux effets dynamiques transversaux.

Conclusion

Les problèmes concernant les sollicitations dynamiques et leurs effets sur les bâtiments élevés à ossature métallique n'ont été posés, dans toute leur complexité, que depuis peu de temps. Cependant, les moyens modernes d'investigation ont permis aux chercheurs d'arriver à une connaissance approfondie des phénomènes qu'ils impliquent.

Toutefois, ce vaste domaine nécessite encore d'importants compléments d'information, notamment sur les données de base concernant les effets du vent et des séismes et le comportement effectif des bâtiments réels, avec toutes leurs caractéristiques constructives et technologiques, difficiles à saisir dans une formulation simple.

L'orientation générale des recherches à venir doit viser une meilleure approche de la réalité au bénéfice de la sécurité, de l'économie et du progrès de la construction.

Bibliographie

[1] B. Baker: The Forth Bridge. Engineering, vol. 38 (1884).

[2] M. F. Barstein: Application of Probability Methods for Design the Effect of Seismic Forces on Engineering Structures. Proceedings – Second World Conf. on Earthq. Eng., Japan, 1960.

[3] A. Beles, M. Ifrim: Elemente de seismologie inginereasca. Editura Tehnica, Bucuresti, 1962.

[4] G. V. Berg: A Study of the Earthquake Response of Inelastic Systems. 1965 Annual Meeting Str. Eng. Ass. of California, Publ. AISI. Févr. 1966.

[5] G. V. Berg: The Skopje, Yugoslavia Earthquake, July 26, 1963. Publ. AISI, 1964.

[6] G. V. Berg, J. L. Stratta: Anchorage and the Alaska Earthquake of March 27, 1964. Publ. AISI, 1964.

[7] G. V. Berg, S. S. Thomaides: Energy Consumption by Structures in Strong-Motion Earthquakes. Proceedings – Second World Conf. on Earthq. Eng., Japan, 1960.

[8] V. Bertero, E. P. Popov: Effect of Large Alternating Strains of Steel Beams. Proceedings ASCE, J. Str. Div. Févr. 1965.

[9] V. V. Bolotin: Statistical Theory of the Aseismic Design of Structures. Proceedings – Second World Conf. on Earthq. Eng., Japan, 1960.

[10] J. G. Bouwkamp, R. W. Clough: Dynamic Properties of a Steel Frame Building. 1965 Annual Meeting Str. Eng. Ass. of California, Publ. AISI. Févr. 1966.

[11] R. W. Clough, K. L. Benuska: Nonlinear Earthquake Behavior of Tall Buildings. ASCE Str. Eng. Conf., Miami, Florida, 1966.

[12] R. Crawford, H. S. Ward: Determination of the Natural Periods of Buildings. Bull. Seismological Soc. of America, vol. 54. Déc. 1964.

[13] A. G. Davenport: The Treatment of Wind Loading on Tall Buildings. Symposium on Tall Buildings. Univ. of Southampton. Avril 1966.

[14] R. E. DAVID: Tremblements de terre dans la province de Québec. Leurs effets sur les bâtiments. Canadian Institute of Steel Construction, Montréal, mars 1962.
[15] H. J. DEGENKOLB: Earthquake Forces on Tall Structures. Publ. Bethlehem Steel Corp., 1965.
[16] CH. DUBAS: Les tremblements de terre et leurs effets sur les ouvrages. Texte de la Conf. du 15 oct. 1965 à l'EPF, Zurich.
[17] G. EIFFEL: Travaux scientifiques exécutés à la tour de trois cents mètres de 1889 à 1900. Paris, 1900.
[18] N. ESQUILLAN: Les règles françaises 1963 définissant les effets du vent sur les constructions. Proceedings, Conf. Nat. Phys. Lab. Teddington, Middlesex. Juin 1963.
[19] W. EVANS: Earthquakes and Earthquake-Resistant Buildings in Japan. Civil Eng. and Public Works Review. Août, sept., oct. 1964.
[20] G. A. GAMBURZEV: Grundlagen seismischer Erkundung. (Trad.) Verlag Otto Sagner, München, 1965.
[21] E. GIANGRECO: Alcune considerazioni e confronti in merito ai regolamenti per edifici in zona sismica. (Rapport non publié.) Conv. Europ. de la Constr. Mét., 1966.
[22] T. HISADA, K. NAKAGAWA: Vibrations of Buildings in Japan. Part II: Vibration Tests on Various Types of Building Structures up to Failure. Proceedings – First World Conf. on Earthq. Eng., Berkeley, California, 1956.
[23] M. R. HORNE: Wind loads on Structures. Journal Inst. of Civil Eng., Nr. 3. Janvier 1950.
[24] G. W. HOUSNER: Limit Design of Structures to Resist Earthquakes. Proceedings – First World Conf. on Earthq. Eng., Berkeley, California, 1956.
[25] G. W. HOUSNER: The Plastic Failure of Frames during Earthquakes. Proceedings – Second World Conf. on Earthq. Eng., Japan 1960.
[26] G. W. HOUSNER, P. C. JENNINGS: Generation of Artificial Earthquakes. Proceedings ASCE, Eng. Mech. Div., vol. 90. Février 1964.
[27] D. E. HUDSON: A Comparison of Theoretical and Experimental Determination of Building Response to Earthquakes. Proceedings – Second World Conf. on Earthq. Eng., Japan 1960.
[28] M. IFRIM: Dynamic Analysis of Tall Structures Subjected to Earthquake Motions. Proceedings – Second World Conf. on Earthq. Eng., Japan 1960.
[29] F. E. KOKINOPOULOS: Aseismic Dynamic Design of Multistory Systems. Proceedings ASCE, J. Str. Div. Juin 1966.
[30] I. L. KORCINSKI, S. V. POLIAKOV, V. A. BITTOVSKI, S. IU. DUZINKEVICI, V. S. PAVLIK: Bazele proiectarii cladirilor in regiunile seismice. (Traduction.) Editura Tehnica, Bucuresti 1964.
[31] S. MACKEY: High Building Research in Hong-Kong. (Unpublished report), 1966.
[32] C. W. NEWBERRY: The Measurement of Wind Pressures on Tall Buildings. Proceedings – Conf. Nat. Phys. Lab. Teddington, Middlesex. Juin 1963.
[33] N. M. NEWMARK: Computation of Dynamic Structural Response in the Range Approaching Failure. Proceedings – Symposium on Earthquake and Blast Effects on Structures, Los Angeles, 1952.
[34] N. N. NIELSEN: Vibration Tests of a Nine-Story Steel Frame Building. Proceedings ASCE, J. Eng. Mech. Div. Février 1966.
[35] E. P. POPOV; H. A. FRANKLIN: Steel Beam-Column Connections subjected to Cyclically Reversed Loading. 1965 Annual Meeting Str. Eng. Ass. of California, Publ. AISI. Févr. 1966.
[36] J. C. RATHBUN: Wind Forces on a Tall Building. Transactions ASCE, vol. 105 (1940).
[37] E. ROSENBLUETH: Probabilistic Design to Resist Earthquake. Proceedings ASCE, J. Mech. Div. Oct. 1964.
[38] M. G. SALVADORI, E. HEER: Periods of Framed Buildings for Earthquake Analysis. Proceedings ASCE, J. Str. Div. Décembre 1960.
[39] D. SFINTESCO: Effets du vent sur les ossatures métalliques. Une recherche qui s'impose. Mémoires de l'A.I.P.C., 26e vol., 1966.
[40] H. TAJIMI: A Statistical Method of Determining the Maximum Response of a Building Structure during an Earthquake. Proceedings – Second World Conf. on Earthq. Eng., Japan 1960.

[41] C. URBANO: Effet de l'écrouissage dans les vibrations élasto-plastiques. Construction Métallique. Juin 1966.

[42] H. S. WARD: Analog Simulations of Earthquake Motions. Proceedings ASCE, J. Eng. Mech. Div. Oct. 1965.

[43] R. N. WRIGHT, W. J. HALL: Loading Rate Effects on Structural Steel Design. Proceedings ASCE. J. Str. Div. Oct. 1964.

[44] ***: The Agadir, Morocco Earthquake, February 29, 1960. Committee of Structural Steel Producers et AISI.

[45] ***: The Alaska Earthquake, March 27, 1964. National Board of Fire Underwriters et Pacific Fire Rating Bureau, 1964.