

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

**Band:** 8 (1968)

**Artikel:** Sollicitations dynamiques (particulièrement dues au vent et aux séismes)

**Autor:** Borges, J. Ferry

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-8729>

### **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:** 02.04.2026

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

# VI

## Sollicitations dynamiques

### Sollicitations dynamiques (particulièrement dues au vent et aux séismes)

J. FERRY BORGES

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisbon

#### 1. Introduction

Dans le domaine de la construction, le progrès dépend d'une meilleure connaissance tant des charges appliquées que du comportement de l'ouvrage sous l'action de ces charges. D'une manière générale, on peut dire que la connaissance que l'on a actuellement des charges dynamiques n'est pas très grande. On comprend alors facilement l'intérêt qui s'attache, non seulement, à la collecte d'informations propres à permettre une meilleure définition de ces charges, mais aussi à l'élaboration de méthodes de calcul qui leur soient optimalement appropriées.

En ce qui concerne la distinction des charges statiques et des charges dynamiques, il se présente une première difficulté qui tient à ce qu'on ne peut pas opérer cette distinction en considérant exclusivement les charges elles-mêmes mais qu'il faut prendre en compte le type de l'ouvrage sur lequel les charges s'exercent. Pratiquement, on considérera qu'une charge est dynamique si sa variabilité dans le temps est telle que, dans l'étude du comportement de l'ouvrage, il n'est pas possible de négliger les effets de l'inertie des masses de l'ouvrage.

Seconde difficulté pour définir les charges dynamiques: il y a parfois influence réciproque entre le comportement de l'ouvrage et les charges elles-mêmes. En considérant les charges dynamiques comme représentant un système de forces qui varient dans le temps, on constate que ces forces se trouvent souvent directement influencées par le comportement de l'ouvrage. Le cas se présente, par exemple, à propos de l'action du vent due à des effets aéroélasti-

ques et, dans le cas de séismes, du fait de l'interaction entre l'ouvrage et le sol. Dans le présent rapport, on se propose de définir les charges de telle façon qu'il soit possible d'étudier ces interactions en considérant le comportement global du système.

Pour limiter l'étendue de ce rapport, on concentrera l'attention sur les charges qui s'exercent sur les ouvrages ressortissant au génie civil tels qu'immeubles, ponts et tours.

Les charges prises en considération seront celles dues au vent, aux séismes, à la circulation, aux équipements mécaniques et aux explosions. Les deux premières sont en général plus importantes et elles seront étudiées de façon plus détaillée.

Pour chacun de ces types, les principaux problèmes à envisager sont les suivants: 1. la mesure des charges qui s'exercent, 2. leur représentation analytique expérimentale. L'étude des méthodes les mieux appropriées au traitement de ces problèmes est d'une importance capitale, et l'on espère, ainsi qu'il a déjà été dit, qu'au cours du Congrès la discussion portera sur la méthodologie et ne se limitera pas à la présentation de résultats d'observations.

Eu égard au choix de la méthode, deux types fondamentaux de représentation entrent en ligne de compte: le type déterministe et le type stochastique. La représentation déterministe implique une parfaite connaissance de la variation des charges dans le temps. La représentation stochastique exige seulement la connaissance des distributions statistiques de ces variations.

Les vibrations engendrées par des machines ou les pressions provoquées par des explosions peuvent être prises comme exemples de charges se prêtant à une étude déterministe. Mais, en général, seuls des modèles stochastiques permettent de représenter convenablement les pressions du vent et les vibrations sismiques.

Pour approfondir notre connaissance des charges, il est indispensable d'effectuer des mesures dans la nature selon un plan systématique. Du fait du caractère dynamique des charges, ces mesures sont particulièrement difficiles. Les difficultés sont essentiellement de deux sortes. La première difficulté tient au fait que, bien souvent, il est difficile, voire même impossible, de mesurer directement les forces en jeu et que l'on est obligé de mesurer d'autres grandeurs à partir desquelles l'on déduira les forces. Il en est par exemple ainsi du vent, pour lequel c'est la vitesse et non la pression qui doit faire l'objet des mesures; et un nouveau problème se pose donc: celui de la transformation des vitesses en pressions.

La seconde difficulté tient à la réponse de l'appareil de mesure en fonction des fréquences intéressées. En réalité, les appareils de mesure se comportent généralement comme des filtres passe-bas («low-pass filters»), ont souvent une réponse variable en fonction de la fréquence («non-flat frequency») et même, parfois, ne sont pas linéaires («non-linear»), ce qui revient à dire que la réponse est fonction de l'intensité moyenne de la charge. Pour interpréter correctement

les résultats, les appareils de mesure doivent être considérés comme des systèmes de transfert et il faut étudier avec soin les caractéristiques de leur réponse.

Ce sont des difficultés de cette sorte qui, par exemple, se présentent quand on utilise des anémomètres. Pour interpréter les résultats recueillis, il faut dûment prendre en compte les caractéristiques dynamiques de l'appareil.

Une fois qu'on a bien compris la nature des charges, il faut voir quelles représentations on leur donnera dans les études théoriques et les essais. Les représentations en question doivent avoir un caractère aussi fondamental que possible afin que leur application puisse être générale. Quant à la représentation analytique des charges elle doit être adaptée aux théories générales qu'on veut appliquer pour l'étude du comportement de l'ouvrage. En particulier, dans les modèles stochastiques, il faut respecter les principes fondamentaux de la théorie des vibrations aléatoires [1, 2].

Il importe aussi que les représentations analytiques soient aussi simples que possible. Il faut déterminer les effets dus aux simplifications introduites et définir leur domaine d'application.

Quand il s'agit de charges permanentes, la définition de la durée est sans importance. En présence de charges non permanentes, il convient de les diviser en des intervalles de durée donnée. C'est ainsi que les accélérations sismiques et les vitesses du vent seront représentées par des séries chronologiques ayant chacune une durée donnée. Une autre simplification couramment faite consiste à supposer que la distribution statistique dont découle la série chronologique ne change pas avec le temps pendant la période considérée, ce qui revient à admettre que les phénomènes sont stationnaires.

La représentation donnée aux charges dynamiques dans les essais doit elle aussi satisfaire à certaines conditions générales. Ce sont des charges représentatives des charges réelles qu'on applique aux modèles, et c'est à la lumière de certaines lois de correspondance que le comportement de ces modèles doit être interprété. Le cadre dans lequel cette correspondance existe impose des conditions à la représentation des charges. Quand on interprète les résultats, il y a lieu de prendre dûment en considération les limites entre lesquelles les essais sont valables.

C'est ainsi, par exemple, qu'en général les essais en soufflerie ne tiennent pas compte des gradients du vent et ne respectent pas la loi de correspondance pour le régime turbulent. Dans les essais dynamiques exécutés pour étudier les problèmes de nature sismique, on a souvent recours à des vibrations qui sont loin de représenter les mouvements sismiques.

Pour qu'il soit possible de comparer les résultats théoriques et expérimentaux, il convient que les représentations analytiques et expérimentales des charges concordent.

Finalement, on parlera de la prévision des charges. En général, cette prévision doit être faite sur des bases statistiques. On pourra alors seulement appliquer les principes probabilistes de la sécurité.

Il faut bien comprendre que cette prévision statistique n'a rien à voir avec le modèle (déterministe ou stochastique) adopté pour représenter les variations des charges dans le temps.

Les problèmes généraux relatifs aux charges dynamiques s'exerçant sur les constructions ont été tout récemment étudiés dans plusieurs symposiums, parmi lesquels le «Symposium de la RILEM sur la Mesure des Effets Dynamiques et des Vibrations dans les Constructions» qui s'est tenu à Budapest en 1963, le «Symposium sur les Vibrations dans le Génie Civil» organisé à Londres en 1965 [3] et le «Symposium de la RILEM sur les Effets des Répétitions de Charges sur les Matériaux et les Constructions» qui a eu lieu à Mexico en 1966. Les problèmes particuliers se rapportant aux actions du vent et aux charges sismiques ont été traités dans des réunions spéciales que l'on indiquera plus loin. Dans la communication qu'il a présentée au symposium de Mexico [4], DAVENPORT procède à une analyse générale très intéressante et compare les actions du vent et les charges sismiques.

## 2. Action du vent

### 2.1. Nature du vent

La bonne compréhension des phénomènes se rapportant au vent présuppose la connaissance générale des causes du vent.

Comme on le sait, la vitesse du vent augmente avec la hauteur au-dessus du sol pour atteindre une valeur limite à environ 300 à 600 m, valeur qui est principalement régie par les gradients de pression (directement liés aux effets thermiques) et les accélérations géostrophiques. Cette vitesse peut être rapportée, sous une forme analytique, aux causes en question.

La vitesse du vent varie rapidement avec le temps et d'un point à un autre. Cette variation étant aléatoire, le régime est donc turbulent.

Dans l'étude de l'action du vent, il est commode de prendre des intervalles de temps de durée donnée (par exemple de 10 minutes ou de 1 heure) pour calculer la vitesse moyenne du vent dans ces intervalles. La composante de la vitesse traduisant les variations rapides correspond alors à la turbulence.

C'est principalement à propos de la pollution de l'atmosphère [5] et dans le domaine de l'aéronautique [6] que, récemment, la structure du vent a fait l'objet de recherches tenant un juste compte de la turbulence. On dispose maintenant de nombreux renseignements de cette origine, mais seulement une faible partie peut être mise à profit pour étudier l'action du vent sur les constructions. En dépit de cette restriction, il faut reconnaître que les méthodes mises en œuvre dans l'exécution de ces recherches sont celles qui conviennent. Les recherches modernes ayant pour objet l'action du vent sur les constructions procèdent des mêmes principes [7, 8].

## 2.2. La mesure du vent

On peut considérer que la mesure de la vitesse du vent se divise en deux problèmes différents. Le premier a trait à la mesure de la composante basse fréquence qui correspond à la vitesse moyenne; le second concerne la composante haute fréquence due à la turbulence.

Dans le monde entier les services météorologiques ont été chargés de mesurer les vitesses moyennes du vent, et l'on dispose donc d'une vaste information à cet égard. En revanche, ce n'est que dans le cadre de recherches particulières qu'on a effectué des mesures de la turbulence.

Les services météorologiques donnent aussi les vitesses maxima, mais celles-ci sont difficiles à interpréter et, pour le moment, ne sont pas d'un emploi sûr dans le calcul des constructions.

Les différents types d'anémomètres pour la mesure des vitesses du vent peuvent être classés en fonction de leur gamme de fréquences.

Parmi les types basse fréquence, il y a : les tubes statiques de Pitot, les anémomètres à hélice et à ailettes. Ces appareils ont en général des fréquences de coupure d'environ 0,1 Hz.

Dans la gamme des fréquences moyennes, on trouve les anémomètres à membrane ou à masse vibrante avec des fréquences de coupure de l'ordre de 20 Hz.

Enfin, entrent dans la catégorie des hautes fréquences les anémomètres thermiques et les anémomètres électriques à décharge qui réagissent jusqu'à des fréquences de 1000 Hz environ.

A la Fig. 1 on voit un enregistrement caractéristique obtenu avec un anémomètre du type tube de Pitot.

Pour interpréter les enregistrements fournis par ces différents types d'anémomètres, il est nécessaire non seulement de les étalonner statiquement en soufflerie mais aussi de déterminer leur fonction de transfert. De plus, étant donné que bien souvent leur comportement n'est pas parfaitement linéaire, il faut déterminer les fonctions de transfert pour différentes valeurs de la composante statique.

Les mesures en régime turbulent, et notamment la mesure de la turbulence elle-même, s'accompagnent de grandes difficultés [9]. Ces difficultés se trouvent très sensiblement réduites si seules les vitesses moyennes du vent entrent en ligne de compte. Pour les raisons dites, seules les valeurs moyennes de la vitesse du vent représentent un ensemble de données valables permettant de déduire les vitesses maxima. Les relations entre vitesses moyennes et maxima doivent être basées sur la connaissance réelle que l'on a de la structure du vent. Il est hautement souhaitable que les mesures, correctement prises, s'étalent dans la gamme des hautes fréquences. Les données ainsi recueillies permettront alors non seulement de mieux comprendre la turbulence mais aussi d'estimer directement les vitesses maxima.

### 2.3. La représentation du vent

#### 2.3.1. La vitesse moyenne du vent

Dans l'étude des efforts que le vent exerce sur un ouvrage, il suffit de s'intéresser à un volume limité entourant l'ouvrage. Et, comme on l'a déjà dit, seul un intervalle de temps donné doit être considéré, par exemple 10 minutes ou 1 heure.

Généralement, il sera raisonnable d'admettre que, dans le domaine envisagé, la vitesse moyenne se représente par une composante horizontale variant seulement en fonction de la hauteur. Pour définir le champ des vitesses moyennes du vent, il est alors nécessaire de déterminer la loi de variation de la vitesse moyenne avec la hauteur.

Dans la gamme de hauteurs qui intéresse le génie civil, et pour des vents de vitesse élevée (c'est-à-dire ceux qui présentent de l'intérêt dans l'étude de structures), on peut exprimer la vitesse moyenne au niveau  $z$ ,  $\bar{U}_z$ , au moyen d'une loi de la forme suivante:

$$\bar{U}_z = \left( \frac{z}{z_g} \right)^{1/\alpha} \bar{U}_g \quad (1)$$

où  $\bar{U}_g$  est la vitesse atteinte au niveau  $z_g$ . Les valeurs de  $z_g$  et de  $1/\alpha$  dépendent de la rugosité du terrain.

Comme c'est à une hauteur d'environ 10 m au-dessus du sol qu'en général l'on mesure la vitesse du vent, il est commode de prendre comme valeur de référence la vitesse à cette hauteur,  $\bar{U}_{10}$ , et non pas la vitesse  $\bar{U}_g$ .

A la Fig. 2 sont représentés des profils de la vitesse moyenne du vent, selon DAVENPORT [8], relatifs à trois types de rugosité.

A chaque emplacement correspond une distribution statistique de  $\bar{U}_{10}$ , qui définit la probabilité associée au dépassement de cette vitesse au cours d'un intervalle de temps donné.

#### 2.3.2. La turbulence du vent

Du fait de la turbulence il est nécessaire d'ajouter à la vitesse moyenne une vitesse variable définie par ses composantes  $u$ ,  $v$ ,  $w$  (composantes longitudinale, transversale et verticale).

Ces composantes sont censées avoir une variation aléatoire dans l'espace et le temps. On est obligé de recourir à des hypothèses simplificatrices pour donner une définition statistique de ces variations.

Une première hypothèse raisonnable consiste à poser que la turbulence est stationnaire pendant l'intervalle de temps considéré. On peut alors représenter statistiquement la variation de la vitesse en un point en considérant la variation des densités spectrales des vitesses en fonction de la fréquence ou bien en prenant les transformées de Fourier de ces densités spectrales, les fonctions d'auto-corrélation. En postulant l'homogénéité aux différents niveaux, les densités

spectrales de la vitesse peuvent alors varier en fonction de la vitesse moyenne du vent et de la hauteur au-dessus du sol.

Les densités spectrales dans le temps ne permettent pas à elles seules de définir complètement la turbulence. Il est également nécessaire de faire entrer en ligne de compte la variation statistique dans l'espace, représentée par les densités spectrales spatiales ou les corrélations spatiales.

Dans le domaine de l'aéronautique, la turbulence de la composante verticale revêt une grande importance [6]. Il n'en est généralement pas de même en ce qui concerne les effets exercés par le vent sur les constructions. A cet égard, c'est la composante longitudinale qui est d'un intérêt particulier.

A la Fig. 3 on voit la densité spectrale de la composante longitudinale de la vitesse du vent, telle qu'indiquée par DAVENPORT [8]; elle représente la valeur moyenne des mesures effectuées à des hauteurs allant de 8 à 150 m. Comme on a pris les moyennes, cela revient à considérer que la turbulence ne varie pas avec la hauteur dans l'intervalle en question.

Pour représenter par une courbe unique les spectres déterminés dans différentes conditions, Davenport divise la densité spectrale  $S(f)$  par un coefficient  $K$ , qui est un coefficient dépendant de la rugosité, et par  $\bar{U}_{10}^2$ , qui est le carré de la vitesse moyenne au niveau de référence. Ce ne sont pas directement les fréquences qui sont portées en abscisse, dans une échelle logarithmique, mais les nombres d'ondes ou les longueurs d'onde. Le nombre d'ondes, exprimé en cycles par mètre, permet d'obtenir la fréquence (Hz) en le multipliant par la vitesse moyenne (m/s). La longueur d'onde s'obtient en divisant la vitesse moyenne par la fréquence.

L'hypothèse de Taylor consiste à tenir pour valable la transformation  $x = \bar{U}t$ , autrement dit il établit une équivalence entre les variations dans l'espace ( $x$ ) et les variations dans le temps ( $t$ ). En suivant cette hypothèse, la densité spectrale présentée par rapport au temps peut aussi être considérée comme une densité spectrale dans la direction longitudinale.

Etant donné que les abscisses s'expriment dans une échelle logarithmique, il est expédient de multiplier les ordonnées par la fréquence  $f$  afin que l'intégrale de la densité spectrale représente le carré moyen des fluctuations de la vitesse.

Avec des longueurs d'onde inférieures à 500 m, le spectre proposé s'adapte à la loi de KOLMOGOROV [10]. Cette loi lie la densité spectrale  $S(\lambda)$  au nombre d'ondes  $\lambda$  par une relation de la forme  $S(\lambda) = \beta \lambda^{-5/3}$ .

Pour obtenir des indications quantitatives pouvant être directement utilisées dans le dimensionnement des structures, le spectre de la Fig. 3 a été tracé, à la Fig. 4, pour une vitesse moyenne du vent égale à 20 m/s.

Cette figure montre que la densité spectrale réduite  $fS(f)/\sigma^2$  passe par un maximum entre 1 et 2 cycles par minute. Quand la fréquence augmente, la densité spectrale diminue rapidement et, aux fins des applications pratiques, peut être considérée comme nulle au-dessus de 1 ou 2 Hz.

L'intensité relative de la turbulence qui correspond aux spectres des figures 3 et 4 est donnée par  $\sigma/\bar{U}_{10} = \sqrt{6K}$ . Pour  $K = 0,005$ , on obtient une valeur de 0,17 qui concorde avec les intensités courantes de la turbulence, situées entre 10 et 20%, qu'indique PASQUILL [10].

Le seul moyen pour définir la variation de la composante longitudinale de la vitesse du vent dans les directions transversales est de faire intervenir ou bien la corrélation dans ces directions ou bien les densités spectrales transversales  $S(\Delta l, f)$  relatives à des points situés à des distances différentes  $\Delta l$ .

DAVENPORT [11] lie les densités spectrales transversales à la densité spectrale dans le temps  $S(f)$  en introduisant le coefficient :

$$R(\Delta l, f) = \frac{S(\Delta l, f)}{S(f)} = e^{-\frac{cf\Delta l}{\bar{U}_{10}}}$$

où  $c$  est une constante.  $\bar{U}_{10}/cf$  a la dimension d'une longueur et peut être interprété comme une échelle de corrélation.

La distance à laquelle les vitesses du vent se trouvent corrélées est par conséquent inversement proportionnelle à la fréquence et au coefficient  $c$ . Au tableau I on donne, pour des conditions atmosphériques stables (celles qui nous intéressent dans le cas présent), l'ordre de grandeur de la valeur de  $c$  relatif à différentes directions et différentes composantes de la turbulence [11].

Tableau I

Direction de $\Delta l$	Composante de la turbulence	$c$
longitudinale	longitudinale	8
	transversale	6
transversale	longitudinale	40
	transversale	25
verticale	longitudinale	7
	transversale	7

Le fait que les échelles de corrélation sont plus petites dans la direction transversale que dans la direction longitudinale montre que, avec des vents forts, les tourbillons sont allongés.

### 2.4. Effets du vent

Il ne suffit pas de connaître les vitesses du vent pour en déterminer les effets. Il est nécessaire de parvenir à transformer les vitesses en pressions. Si l'on tient effectivement compte du caractère dynamique des phénomènes impliqués, il apparaît qu'aucune solution satisfaisante n'a encore été donnée à ce problème.

Si l'on suppose un écoulement uniforme, une abondante information permet de transformer la vitesse du vent en pressions locales ou totales. Cette information est recueillie dans les codes qui la présentent sous la forme de coefficients de pression.

JENSEN [12] a montré que si on substitue un écoulement uniforme par un profil à couche limite, comme indiqué à la Fig. 2, il en résulte d'importantes variations des coefficients de pression.

Mais si l'on prend en considération le caractère tourbillonnaire du vent, le problème devient beaucoup plus compliqué. A la turbulence propre au vent il faut en fait ajouter celle engendrée par l'ouvrage.

La turbulence créée par l'ouvrage résulte principalement de la génération de tourbillons et elle peut aussi bien dépendre que ne pas dépendre de la déformabilité de l'ouvrage.

Le premier type de phénomènes correspond aux tourbillons de von Kármán. La fréquence  $f$  de la formation du tourbillon est liée à la vitesse moyenne du vent  $\bar{U}$  par le nombre de Strouhal  $S = fD/\bar{U}$  où  $D$  représente une longueur type. Comme il existe une fréquence dominante  $f$ , il ne s'agit pas d'une véritable turbulence; on l'appelle souvent une pseudo-turbulence. LIENHARD [13] a fait le point du problème de la formation des tourbillons dans le cas des cylindres circulaires rigides.

L'excitation des vibrations dues à la déformation de l'ouvrage est un phénomène encore plus complexe. Voici un cas très simple qui permettra de comprendre facilement le mécanisme des vibrations.

Soient un vent horizontal et une construction vibrant dans la direction verticale. Les vibrations de l'ouvrage correspondent à une composante transversale de la vitesse. Combiner cette composante transversale à la composante longitudinale revient à considérer une incidence oblique. Si le corps a un profil tel que, pour cette obliquité de l'incidence, la portance est négative, cette force de portance tend à accroître la vibration du système et peut être identifiée à un amortissement négatif. Si ce dernier a une valeur absolue supérieure à celle de l'amortissement positif de l'ouvrage, il va en résulter des vibrations auto-excitées d'amplitude croissante.

Dans le cas de systèmes à plusieurs degrés de liberté, on peut associer les phénomènes d'instabilité aérodynamique au couplage de différents modes donnant lieu à des phénomènes de battement.

Enfin, il peut aussi se faire que la turbulence engendrée par un ouvrage affecte d'autres constructions voisines.

SCRUTON [14] passe en revue les différents aspects des vibrations des constructions dues aux effets du vent. Les phénomènes mis en jeu sont d'une telle complexité qu'on peut dire qu'il n'est pas encore possible d'obtenir des solutions analytiques de caractère général. Les essais sur modèles exécutés en soufflerie donnent des résultats très utiles.

### *2.5. Essais sur modèles*

Quand on construit un tunnel de soufflerie, on cherche généralement à réduire la turbulence dans toute la mesure du possible. Les tunnels répondant à ces conditions sont bien adaptés à la détermination des coefficients de pression, mais il est bien évident qu'ils ne se prêtent pas à l'étude de l'influence exercée par la turbulence des vents naturels.

On a récemment [8] réalisé plusieurs tunnels destinés à permettre de reproduire la variation de la vitesse du vent avec la hauteur. On obtient cet effet en augmentant les accidents du plancher par rapport à ceux des autres parois. On peut voir à la Fig. 5 la soufflerie à couche limite de l'Université of Western Ontario.

Il serait souhaitable qu'à l'avenir on fût en mesure de régler la turbulence régnant dans les souffleries, afin de pouvoir exécuter des essais dynamiques avec une turbulence à l'échelle.

### *2.6. Données de base pour le calcul*

Parmi les données de base du calcul, il est nécessaire de déterminer les vitesses maxima du vent auxquelles s'appliquent les coefficients de pression. Les vitesses maxima qu'on fait actuellement intervenir ne procèdent généralement pas d'une étude statistique.

Il est important d'être en mesure de lier les vitesses maxima et les vitesses moyennes. Plusieurs auteurs se sont penchés sur ce problème [15, 16]. Adoptant le spectre des vitesses indiqué par DAVENPORT [8], CASTANHETA [17] a calculé la distribution statistique du rapport des vitesses maxima  $U_f$  aux vitesses moyennes enregistrées pendant des intervalles de temps  $t_0$  de 10 minutes ou 1 heure. Les vitesses maxima  $U_f$  sont celles qui seraient enregistrées par des filtres idéaux ayant des fréquences de coupure  $f = 0,2; 0,5; 1,0$  et  $2,0$  Hz.

Le tableau II donne les valeurs obtenues pour le rapport des vitesses maxima moyennes aux vitesses moyennes. Ces valeurs se rapportent à une hauteur de 10 m au-dessus du sol.

Il est intéressant de remarquer que la variation des coefficients due à celle des fréquences de coupure est quasiment indépendante de la valeur du coefficient de rugosité comme de la durée de l'intervalle considéré.

Tableau II

Fréquence de coupure $f$ (Hz)	$t_0 = 10$ minutes			$t_0 = 1$ heure		
	Coefficient de rugosité $K^1)$			Coefficient de rugosité $K^1)$		
	$K=0,005$	$K=0,010$	$K=0,015$	$K=0,005$	$K=0,010$	$K=0,015$
0,2	1,44	1,63	1,77	1,54	1,75	1,92
0,5	1,50	1,71	1,87	1,58	1,83	2,02
1,0	1,53	1,75	1,92	1,63	1,88	2,07
2,0	1,56	1,79	1,97	1,66	1,92	2,13

<sup>1)</sup> Conformément à la définition de DAVENPORT [8]. La valeur  $K = 0,005$  correspond à un terrain plat et  $K = 0,015$  à un relief accidenté, semblable à celui qui se présente au centre d'une ville.

En prenant comme terme de référence la fréquence de 2 Hz, on obtient respectivement une réduction de 2, 4 et 9% de la valeur du rapport des vitesses maxima aux vitesses moyennes pour les fréquences de coupure de 1,0; 0,5 et 0,2 Hz.

En identifiant le comportement d'un ouvrage à celui d'un filtre de fréquence de coupure donnée, les réductions indiquées pourraient être appliquées aux vitesses maxima dont on se sert pour le calcul. Etant donné que les pressions sont proportionnelles au carré des vitesses, les réductions de la pression seraient deux fois celles indiquées.

Dans le cas d'ouvrages ayant une longue façade, on peut faire intervenir une nouvelle réduction en considérant la corrélation transversale des vitesses du vent. Jusqu'à présent, c'est sur une base expérimentale que ces réductions ont été déterminées [18, 19]. Les renseignements dont on dispose maintenant en matière de turbulence du vent sont déjà suffisants pour permettre d'estimer ces réductions [17, 20].

De ce qui vient d'être dit ci-dessus, il ressort qu'il n'est légitime de prendre en compte des réductions de la charge du vent dues à la turbulence qu'à propos d'ouvrages de très faible fréquence, tels que les ponts suspendus de longue portée, les lignes aériennes de transport d'électricité et les bâtiments de grande hauteur (Fig.4). Les ouvrages de cette catégorie présentent des fréquences propres d'environ 0,1 Hz ou même inférieures. Il n'en est pas de même des bâtiments ordinaires (ne dépassant pas 10 étages) qui ont en général des fréquences supérieures à 1 Hz. Avec les constructions de cette sorte, on peut considérer le vent comme étant une charge statique.

D'un autre côté, quand il s'agit d'ouvrages hautement déformables, tels que les ponts suspendus, les phénomènes aéroélastiques peuvent être de toute première importance [21].

Pour approfondir nos connaissances en matière de l'action du vent, il apparaît indispensable de procéder à des observations sur le comportement réel des constructions [22]. Les études de cette sorte confirmeront les hypothèses émises et désigneront les directions de recherche les plus prometteuses.

### 3. Charges sismiques

#### 3.1. Nature des séismes

Il est admis d'une manière générale que ce sont des ruptures locales de l'écorce terrestre qui produisent les tremblements de terre. Les vibrations sismiques peuvent être ressenties à de très grandes distances de l'épicentre mais, la plupart du temps, seules les constructions proches de l'épicentre s'en trouvent affectées. A l'intérieur de la zone de destruction, les mouvements du sol ont un caractère irrégulier, ainsi qu'en témoignent les enregistrements dont on dispose (Fig. 6).

Les explosions provoquées par l'Homme peuvent elles aussi être la cause de vibrations du sol qui, à certains égards, peuvent être comparées avec les mouvements d'origine sismique.

Sous l'action des vibrations sismiques, des masses d'eau entrent en mouvement et peuvent, en mer, donner naissance à de grosses vagues (tsunami) ainsi qu'engendrer des pressions hydrodynamiques s'exerçant sur des ouvrages immergés ou en contact avec l'eau.

Au cours de ces dernières années, de nombreux efforts ont été consacrés à l'étude des causes des séismes, à l'effet de définir la sismicité des différentes régions du globe, d'étudier les méthodes les mieux appropriées à la mesure et à la représentation des mouvements sismiques et d'analyser le comportement des constructions sous l'action des charges sismiques. Parmi l'abondante littérature qui traite de ces sujets, les procès-verbaux de la Conférence mondiale de l'«International Association on Earthquake Engineering» revêtent une importance toute particulière [23, 24, 25]. Il convient également de souligner les efforts récemment mis en œuvre par l'UNESCO en vue de coordonner et de promouvoir les recherches en ce domaine.

#### 3.2. La mesure des séismes

S'il y a de nombreuses années que l'on enregistre les mouvements du sol de faible amplitude provoqués par des tremblements de terre lointains, ce n'est que récemment qu'à été mis au point l'appareillage approprié à l'enregistrement des mouvements de forte amplitude [26].

Les appareils que l'on utilise maintenant enregistrent les trois composantes de l'accélération du sol, et le processus d'enregistrement démarre automatiquement dès que la composante verticale ou l'une des composantes horizontales excède environ 0,01 g.

Grâce aux caractéristiques dynamiques de ces appareils et à la vitesse à laquelle les enregistrements se font, il est possible de pousser plus loin l'analyse des vibrations sismiques. Le nombre aussi des accélérographes pour mouvements de forte amplitude augmente rapidement. Mais les régions sismiques les plus importantes ne sont cependant pas encore équipées de façon satisfaisante.

### *3.3. La représentation des tremblements de terre*

On doit à HOUSNER [27] une très importante contribution à la représentation des mouvements du sol d'origine sismique; il a assimilé ces mouvements à une série d'impulsions aléatoires et les a représentés par des spectres de déplacements, de vitesses et d'accélération. Selon la définition de Housner, le spectre d'une grandeur donnée, prenons la vitesse par exemple, indique les vitesses maxima qui seront imparties à des oscillateurs simples de différentes fréquences propres et ayant un amortissement différent lorsqu'ils seront soumis aux mouvements considérés. Housner a calculé les spectres relatifs à plusieurs accélérogrammes de forte amplitude et a proposé de représenter les mouvements sismiques par les spectres qui sont donnés à la Fig. 7.

Une autre façon de décrire le caractère aléatoire de l'accélération du sol consiste à définir la densité spectrale de l'accélération. Pour ce faire, on a recours aux grandeurs fondamentales de la théorie des vibrations aléatoires dont on s'est également servi à propos de la représentation de la turbulence du vent.

La représentation adoptée par HOUSNER et d'autres [28, 29] correspond à une vibration à densité spectrale d'accélération constante (bruit blanc). TAJIMI [30], à partir des travaux préliminaires de KANAI [31], et BARSTEIN [32] ont suggéré l'idée de faire varier la densité spectrale en fonction de la fréquence. Dans une étude traitant de la conception probabiliste du calcul des ouvrages résistants aux tremblements de terre, ROSENBLUETH [33] passe en revue les différentes représentations théoriques des charges sismiques.

BYCROFT [34] a montré que les spectres de vitesses présentés par Housner étaient équivalents à une vibration à densité spectrale constante à l'intérieur de la gamme 0,2-5 Hz, chaque échantillon ayant une durée de 30 s. Il donne la densité spectrale de  $695 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-4}/\text{Hz}$  comme équivalente à l'enregistrement nord-sud du tremblement de terre d'El Centro de 1940.

Tout dernièrement, RAVARA [35], JENNINGS [36] et ARIAS et PETIT LAURENT [37] ont utilisé des calculateurs digitaux pour déterminer directement à partir d'enregistrements sismologiques disponibles les densités spectrales correspondantes.

Bien que les spectres présentent d'importantes fluctuations, il est possible d'en déduire une loi de variation moyenne des densités spectrales en fonction de la fréquence (Fig. 8). Différents auteurs [30, 36, 38, 39] ont proposé des expressions analytiques rendant compte de cette variation. On doit s'attendre à ce que la variation de la densité spectrale dépende de la géométrie et des propriétés mécaniques du sol. Malheureusement, l'information actuellement disponible ne permet pas encore de déterminer quantitativement cette influence ni celle due à la distance de l'épicentre.

Il faut souligner que la différence n'est pas aussi grande qu'on pourrait croire entre la représentation au moyen d'un bruit blanc de gamme de fréquences limitée et la fonction spectrale correspondant à un oscillateur linéaire. En fait, les systèmes mécaniques se comportent toujours comme des filtres qui bloquent les fréquences au-dessus d'une certaine limite, et ce tout aussi bien si la vibration sismique a une densité spectrale nulle ou non nulle au-dessus de cette limite. PEREIRA [39] a comparé les réponses fournies par les oscillateurs linéaires pour 3 types de fonctions spectrales (Fig. 8), et les résultats qu'il a obtenus, qui sont indiqués à la Fig. 9, confirment la conclusion avancée ci-dessus.

Pour avoir une image complète des mouvements du sol, il serait nécessaire de déterminer en chaque point non seulement la variation de l'accélération avec le temps mais aussi les corrélations, décalées dans différentes directions. Aucun élément ne permet actuellement d'obtenir ces données. Il n'en reste pas moins que les corrélations dans le temps calculées par BARSTEIN [32] et ARIAS et PETIT LAURENT [37] fournissent des renseignements utiles sur les dimensions des zones dans lesquelles on peut considérer que les vibrations du sol sont approximativement uniformes. Pratiquement, l'intervalle de temps pour lequel la corrélation tombe est de l'ordre de 0,1 s; ainsi, compte tenu des vitesses de propagation des ondes sismiques, les points situés à une distance d'environ 100 m ont des mouvements semblables au même instant. Il n'est plus ainsi avec des points distants de plus de 500 m.

BOGDANOFF, GOLDBERG et SCHIFF [40] ont proposé de représenter les tremblements de terre selon un modèle qui permet d'étudier le caractère non uniforme des vibrations en différents points. Leur méthode consiste à considérer des paquets d'ondes oscillatoires amorties avec vitesses de propagation, phases, temps d'arrivée, fréquences et amplitudes aléatoires. Ce modèle est utilisé dans l'étude des vibrations longitudinales des ponts suspendus.

### *3.4. Le comportement des constructions*

Les méthodes analytiques qui se trouvent maintenant à notre disposition permettent d'étudier le comportement des constructions dans le cadre d'hypothèses très générales. Les modèles discrets à répartition discontinue des masses, exprimés sous forme matricielle, constituent un outil très efficace pour le calcul

dynamique des structures et s'adaptent particulièrement bien à l'emploi de calculateurs digitaux.

L'idéalisation des tremblements de terre qui a été décrite ci-dessus constitue une base nécessaire pour exécuter ce calcul dynamique.

En ce qui concerne la représentation des tremblements de terre, il ne faut pas oublier que, du fait des interactions entre le sol et les fondations, les vibrations qui s'appliquent réellement aux ouvrages peuvent très sensiblement différer de celles qu'on considère. La seule façon de traiter ce problème consiste à étudier de la manière voulue le comportement de l'ensemble du système ouvrage-sol et à poser qu'à une distance suffisante de l'ouvrage les vibrations du sol concordent avec les représentations qui en sont faites.

### *3.5. Essais sur modèles*

Bien que l'emploi des calculateurs digitaux confère maintenant une puissance largement accrue aux méthodes analytiques, il reste encore maints problèmes non résolubles par ces méthodes, et pour qui les essais sur modèles sont indiqués. Tant les modèles mécaniques que les analogies électriques peuvent être considérés comme constituant des modèles concrets, bien que les analogies électriques soient en général plus proches des modèles analytiques.

On a utilisé avec un grand succès les calculateurs analogiques dans l'étude des problèmes dynamiques relatifs aux effets des séismes [41]. Les vibrations aléatoires sont commodément étudiées de cette façon. En fait, les générateurs de bruits blanc constituent un équipement classique que l'on peut mettre en œuvre pour alimenter les calculateurs analogiques.

Dans les essais, dynamiques, différentes techniques peuvent être appliquées pour reproduire les vibrations du sol [42]. Il y a de nombreuses années qu'on utilise les tables à vibrations sinusoïdales asservies en fréquence et en amplitude. Dans d'autres cas, on engendre les vibrations par des chocs qui provoquent des vibrations sinusoïdales amorties dont la fréquence dépend du système de ressorts fixé à la table.

Au Laboratório Nacional de Engenharia Civil, on a, depuis 1960, exécuté des essais sur modèles en recourant principalement à des vibrations aléatoires [43, 44]. L'installation d'essais est représentée à la Fig. 10. Les charges appliquées au modèle représentent les vibrations du sol à une échelle convenable, et la durée ainsi que le spectre (sous la forme, généralement, d'un bruit blanc d'étendue limitée) y sont reproduits. En exécutant plusieurs essais, il est possible de déterminer les valeurs maxima moyennes de la réponse. En augmentant progressivement la densité spectrale, on peut étudier le comportement dans le domaine non linéaire et même jusqu'à la rupture. De même au Japon [45, 46], on a ces temps-ci exécuté des essais sur modèles comportant des vibrations à spectre constant.

Les dispositifs vibrants utilisés dans ces recherches sont du type électromagnétique et, partant, ne conviennent que pour des fréquences supérieures à 20 Hz. On produit maintenant dans certains pays des systèmes à vérins hydrauliques à commande automatique qui sont parfaitement adaptés à l'exécution d'essais dynamiques sur modèles. Avec ces vérins, on peut appliquer des efforts de plusieurs centaines de tonnes d'ordre de grandeur en les faisant varier avec des fréquences atteignant jusqu'à 20 Hz environ [47]. Comme, dans certains cas, on peut faire varier les forces conformément à un programme déterminé, il est également possible d'appliquer des vibrations de caractère aléatoire. Les systèmes de ce type seront dans le futur très utiles dans les recherches sismologiques procédant d'essais sur modèles.

### *3.6. Données de base pour le calcul*

Les codes de construction d'ouvrages résistants aux tremblements de terre [48] indiquent généralement, parmi leurs spécifications, des coefficients à appliquer au poids des masses aux différents niveaux, ce qui permet de déterminer les efforts horizontaux sur la base desquels on doit calculer l'ouvrage. De cette façon, les forces sismiques dynamiques sont transformées en charges statiques équivalentes.

Il est très difficile de déterminer les coefficients sismiques de façon qu'ils contiennent toute l'information correspondant à une analyse dynamique complète. En dépit de son caractère approximatif, le calcul basé sur les coefficients sismiques garantit une résistance aux efforts horizontaux, et c'est là un élément très important du point de vue pratique.

Etant donné les difficultés dont s'assortit l'analyse dynamique, on peut considérer, surtout lorsqu'il s'agit d'ouvrages de types courants tels que par exemple les immeubles ordinaires, qu'il est commode de fournir aux bureaux d'études une information présentée sous la forme d'une spécification de coefficients sismiques. Dans le cas d'ouvrages tels que barrages, grands immeubles à étages multiples, ponts et tours de grandes dimensions, il est généralement nécessaire de procéder à une analyse dynamique complète [49].

## **4. Autres charges dynamiques**

En raison de l'espace limité qui est mis à la disposition de ce rapport préliminaire, seule une brève allusion peut être faite aux principaux types de charges dynamiques.

L'exposé qui suit n'est qu'une introduction visant à stimuler la discussion à propos des charges dynamiques autres que celles dues au vent et aux tremblements de terre.

#### *4.1. Charges de circulation*

Les problèmes relatifs aux charges dynamiques de circulation s'exerçant sur les ponts sont entièrement différents selon qu'il s'agit de ponts-routes ou de ponts-rails.

En ce qui concerne les ponts-routes, la tendance actuelle, dans les codes, est d'opérer une distinction entre les charges dues aux congestions du trafic et celles dues à des véhicules de poids exceptionnellement élevé [50]. Les situations intermédiaires ne correspondent pas à des conditions extrêmes. Du fait que les congestions du trafic peuvent être considérées comme représentant des charges statiques, on n'a à étudier le comportement dynamique que pour les véhicules exceptionnellement lourds.

Pour les ponts-rails, le problème est complètement différent. La répétition des charges, souvent associée à une inversion des contraintes, peut engendrer la fatigue. L'étude du comportement dynamique est alors de toute première importance.

Une autre charge dynamique de circulation est celle due à l'atterrissage des avions.

Pour mieux connaître les charges de circulation telles qu'elles se manifestent réellement, il semble utile de considérer séparément les effets dynamiques de type déterministe et ceux de type stochastique. On pourrait alors analyser les uns et les autres conformément aux théories qui leur correspondent respectivement. Et l'on aurait ainsi des règles de calcul plus précises que celles actuellement appliquées.

#### *4.2. Charges dues aux machines*

Les charges dynamiques dues aux machines peuvent en général être déterminées sur une base déterministe par assimilation à des vibrations périodiques. Dans certains cas, il y a des équipements spéciaux, tels que les broyeurs à boulets, qui engendrent aussi des vibrations de caractère aléatoire.

Chaque problème de vibrations de machine a ses particularités propres, et il est difficile de donner des indications d'ordre général présentant de l'intérêt. Il y a des livres spécialisés [51, 52] qui contiennent d'utiles renseignements à ce sujet.

#### *4.3. Charges dues aux explosions*

On entend par là à la fois les vibrations du sol et les variations de la pression de l'air dues à des explosions provoquées par l'Homme.

En ce qui concerne les vibrations du sol, les effets des explosions peuvent être assimilés à des mouvements sismiques. Les enregistrements qui ont été réalisés montrent que l'on peut aussi considérer que les accélérations sont

aléatoires, mais la durée des vibrations est bien plus brève que celle qui est admise à propos des tremblements de terre [53].

Dans les études traitant des explosions pratiquées pour exploiter les carrières [54], on rapporte les dommages subis par les constructions ainsi que les pointes d'accélération ou de vitesse à la distance par rapport au lieu de l'explosion et à la charge d'explosif. D'autres travaux ont pour objet les explosions nucléaires souterraines et l'analyse de leurs enregistrements à partir de leur densité spectrale [55].

Les effets de souffle se rapportent principalement aux explosions nucléaires dans l'atmosphère. L'onde de pression qui résulte d'une explosion à proximité du sol consiste en une brusque augmentation de pression suivie d'une chute qui aboutit à une demi-onde de pression négative [56]. L'onde de pression a une forme bien déterminée, ce qui fait que l'on peut appliquer la théorie déterministe des vibrations pour étudier ses effets sur les constructions.

C'est dans une perspective «stratégique», tenant compte du degré de protection voulu, qu'il faut fixer la valeur de la charge sur laquelle baser le calcul.

Les ondes de choc provoquées par les vitesses supersoniques peuvent aussi être considérées comme entrant dans cette catégorie de charges.

## 5. Conclusions

Le principal objet de ce rapport préliminaire est de servir de base à la discussion qui doit avoir lieu durant le Congrès. C'est à cet effet que maintenant, pour conclure, vont être formulées quelques propositions portant sur des thèmes de recherche qu'il serait souhaitable de voir aborder dans la discussion.

5.1. On souligne la nécessité qui s'attache à une définition correcte des charges s'exerçant sur les constructions. Il importe de formuler ces définitions selon des principes fondamentaux en rapport avec les théories générales solidement établies. Il serait utile de discuter des méthodes les mieux propres à l'atteinte de cet objectif.

5.2. On a décrit les progrès qui ont récemment été réalisés quant à la connaissance des effets dynamiques du vent. En vue d'accroître l'information actuelle, il apparaît souhaitable :

5.2.1. D'enregistrer systématiquement non plus seulement les vitesses moyennes, ainsi qu'on le fait déjà, mais aussi la turbulence du vent en mettant en œuvre les anémomètres appropriés.

5.2.2. D'affiner la représentation qu'on donne actuellement du vent, en recourant à des spectres de vitesses qui varient en fonction des conditions géographiques et des autres variables entrant en ligne de compte.

5.2.3. D'établir sur une base statistique saine les vitesses à prendre en compte dans le calcul.

5.2.4. D'étudier le comportement dynamique des constructions en prenant simultanément en considération la turbulence propre au vent lui-même et celle engendrée par l'ouvrage. A cet égard, les études sur modèles faisant intervenir le profil des vitesses du vent et les effets de la turbulence semblent prometteuses.

5.2.5. De poursuivre l'observation des constructions importantes afin de recueillir plus de renseignements concernant leur comportement sous les effets du vent.

5.2.6. D'inclure dans les codes de construction non seulement les données simplifiées à faire intervenir dans le calcul des constructions courantes mais aussi les données de base permettant de calculer les ouvrages importants.

5.3. Pour arriver encore à une meilleure définition des charges sismiques, il semble devoir être fructueux :

5.3.1. De continuer à installer des accélérographes pour mouvements de forte amplitude et d'analyser rigoureusement les enregistrements.

5.3.2. De définir les charges sismiques au moyen de la densité spectrale d'accélération en faisant intervenir les variations des spectres dues aux conditions locales.

5.3.3. De définir la séismicité d'une région comme étant la probabilité dont s'assortit, dans cette région, l'atteinte d'un niveau donné de la densité spectrale d'accélération. Pour évaluer la séismicité des différentes régions, il est nécessaire de combiner les divers renseignements d'ordre géophysique, géologique et sismologique en utilisant, dans toute la mesure du possible, des critères quantitatifs statistiques.

5.3.4. De poursuivre les études théoriques et expérimentales basées sur la théorie des vibrations aléatoires, en vue principalement de recueillir de nouveaux renseignements sur le comportement des systèmes linéaires et non linéaires à plusieurs degrés de liberté.

5.3.5. De compléter la mise en place des accélérographes pour forte amplitude destinés à l'enregistrement des accélérations du sol par l'installation d'appareils permettant aussi d'observer le comportement des constructions elles-mêmes. Il est aussi possible d'obtenir des renseignements utiles en exécutant des essais dynamiques sur des ouvrages existants, même en appliquant des vibrations de faible amplitude.

5.3.6. Il est extrêmement souhaitable d'apporter des améliorations aux codes de construction. Comme pour le vent, il serait bon que les codes fassent état de règles simplifiées à appliquer dans le calcul des constructions de type ordinaire et contiennent aussi des données de base à faire intervenir dans les études spéciales qui ont pour objet des ouvrages importants.

5.4. La discussion pourra également porter sur des charges dynamiques autres que les poussées du vent et les charges sismiques. Parmi ces autres charges, il a été fait mention des charges de circulation, des charges dues aux machines et de celles dues aux explosions. L'établissement de nouvelles données, basées sur des principes scientifiques modernes, contribuera largement à rendre

plus économiques les réalisations du génie civil et à leur conférer une sécurité accrue.

5.5. Il faut enfin souligner l'importance que revêt la coopération internationale en tant qu'instrument puissant du progrès. Cette coopération est de nature à se révéler tout particulièrement fructueuse dans l'élaboration de recommandations de caractère général pouvant servir de base à la rédaction des codes propres aux différentes régions.

#### *Remerciements*

L'auteur exprime sa reconnaissance à MM. JERVIS PEREIRA, MÁRIO CASTANHETA et ARTUR RAVARA, Spécialistes et Assistant de recherches au Laboratório Nacional de Engenharia Civil, pour leur collaboration.