
**Vibrations mécaniques — Vibrations
et bruits initiés au sol dus à des lignes
ferroviaires —**

**Partie 32:
Mesurage des propriétés
dynamiques du sol**

*Mechanical vibration — Ground-borne noise and vibration arising
from rail systems —*

Part 32: Measurement of dynamic properties of the ground

get full document from standards.iteh.ai



Sample Document

get full document from standards.iteh.ai



DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT

© ISO 2015, Publié en Suisse

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie, l'affichage sur l'internet ou sur un Intranet, sans autorisation écrite préalable. Les demandes d'autorisation peuvent être adressées à l'ISO à l'adresse ci-après ou au comité membre de l'ISO dans le pays du demandeur.

ISO copyright office
Ch. de Blandonnet 8 • CP 401
CH-1214 Vernier, Geneva, Switzerland
Tel. +41 22 749 01 11
Fax +41 22 749 09 47
copyright@iso.org
www.iso.org

Sommaire

Page

Avant-propos	iv
Introduction	v
1 Domaine d'application	1
2 Références normatives	1
3 Symboles	1
4 Transmission des vibrations et des bruits initiés au sol	3
4.1 Généralités	3
4.2 Vibrations et bruits initiés au sol — Effet de la fréquence	4
5 Paramètres relatifs à la propagation des ondes dans le sol	4
5.1 Généralités	4
5.2 Paramètres fondamentaux de propagation d'onde	5
5.3 Pertes du matériau et non-linéarité	10
5.4 Effets géométriques, stratification et variabilité latérale du sol	14
5.5 Effets de champ proche	16
5.6 Anisotropie	16
5.7 Effets des eaux souterraines — Matériaux du sol en tant que milieux biphasés	17
6 Méthodes d'estimation et de mesurage des paramètres	18
6.1 Stratification et classification du sol: Rapports de forage et études sismiques	18
6.2 Sols et roches	18
6.3 Méthodes d'estimation empirique basées sur des paramètres de référence	19
6.3.1 Généralités	19
6.3.2 Masse volumique apparente (effective)	19
6.3.3 Célérité des ondes et module élastique de cisaillement	19
6.3.4 Non-linéarité et facteur de perte du matériau	23
6.4 Détermination indirecte à partir d'essais géotechniques de pénétration in-situ	28
6.4.1 Généralités	28
6.4.2 Essai de pénétration au cône	28
6.4.3 Essai de pénétration standard	28
6.5 Mesurages directs in-situ des paramètres dynamiques du sol	29
6.5.1 Généralités	29
6.5.2 Mesurages des ondes de surface	34
6.5.3 Mesurages «down-hole» (et «up-hole») — Essai CPT sismique (S-CPT)	40
6.5.4 Mesurages «cross-hole»	43
6.5.5 Autres mesurages — Réfraction et mesurage multicanaux de la réflexion des ondes p et s, résistivité	46
6.5.6 Autres méthodes in-situ	47
6.6 Mesurage direct en laboratoire des paramètres dynamiques du sol	47
6.6.1 Généralités	47
6.6.2 Mesurages piézoélectriques	48
6.6.3 Essai à la colonne de résonance	51
6.6.4 Essai triaxial cyclique, essai DSS et essai de cisaillement en torsion	52
7 Stratégie pour la détermination des paramètres du sol	52
7.1 Généralités	52
7.2 Sévérité attendue des vibrations et des bruits initiés au sol	52
7.3 Estimation des paramètres à partir des informations disponibles	53
7.4 Récapitulatif de comparaison entre mesurages in situ et mesurages en laboratoire	53
7.5 Mesurage direct de la propagation des vibrations et des bruits en alternative au mesurage des propriétés dynamiques et à l'utilisation de modèles de calcul	54
Annexe A (informative) Abréviations utilisées dans la présente partie de l'ISO 14837	55
Bibliographie	56

Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (IEC) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les procédures utilisées pour élaborer le présent document et celles destinées à sa mise à jour sont décrites dans les Directives ISO/IEC, Partie 1 Il convient, en particulier, de prendre note des différents critères d'approbation requis pour les différents types de documents ISO. Le présent document a été rédigé conformément aux règles de rédaction données dans les Directives ISO/IEC, Partie 2 (voir www.iso.org/directives).

L'attention est appelée sur le fait que certains des éléments du présent document peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. L'ISO ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et averti de leur existence. Les détails concernant les références aux droits de propriété intellectuelle ou autres droits analogues identifiés lors de l'élaboration du document sont indiqués dans l'Introduction et/ou dans la liste des déclarations de brevets reçues par l'ISO (voir www.iso.org/brevets).

Les appellations commerciales éventuellement mentionnées dans le présent document sont données pour information, par souci de commodité, à l'intention des utilisateurs et ne sauraient constituer un engagement.

Pour une explication de la signification des termes et expressions spécifiques de l'ISO liés à l'évaluation de la conformité, ou pour toute information au sujet de l'adhésion de l'ISO aux principes de l'Organisation mondiale du commerce (OMC) concernant les obstacles techniques au commerce (OTC), voir le lien suivant: www.iso.org/iso/fr/avant-propos.html.

Le comité chargé de l'élaboration du présent document est l'ISO/TC 108, *Vibrations et chocs mécaniques, et leur surveillance*, sous-comité SC 2, *Mesure et évaluation des vibrations et chocs mécaniques intéressant les machines, les véhicules et les structures*.

L'ISO 14837 est constituée des parties suivantes regroupées sous le titre général *Vibrations mécaniques — Vibrations et bruits initiés au sol dus à des lignes ferroviaires*:

- *Partie 1: Directives générales*
- *Partie 32: Mesurage des propriétés dynamiques du sol*

La partie suivante est en cours d'élaboration:

- *Partie 31: Guide de mesurage pour l'évaluation de l'exposition humaine dans les bâtiments*

Introduction

Afin de résoudre les problèmes liés aux vibrations et aux bruits générés par les lignes ferroviaires lorsqu'une partie du chemin de transmission est constituée de sol ou de roche entre la source au niveau de la voie et l'emplacement du récepteur dans le bâtiment, il est nécessaire de connaître les fonctions de transmission des vibrations et des bruits dans le sol. Pour cela, il est nécessaire de connaître les propriétés des matériaux dans le sol et leur stratification qui influencent la transmission. En règle générale, il est nécessaire que ces propriétés soient mesurées ou alternativement estimées. À cette fin, la présente partie de l'ISO 14837 définit des méthodes de mesure et d'estimation des paramètres dynamiques du sol.

Après un aperçu succinct des vibrations et des bruits initiés au sol dans [l'Article 4](#), le contenu essentiel de la présente partie de l'ISO 14837 se trouve dans deux articles: [l'Article 5](#) définit les paramètres dynamiques pertinents du sol et décrit la manière dont ils sont reliés entre eux et la manière dont ils sont reliés à la physique de la propagation des ondes; [l'Article 6](#) traite des méthodes pour déterminer ces paramètres: le [paragraphe 6.3](#) présente des méthodes d'estimation simples basées sur des corrélations empiriques avec les paramètres conventionnels géotechniques et d'ingénierie géologique; le [paragraphe 6.4](#) présente les méthodes de détermination indirectes à partir d'essais géotechniques de pénétration in-situ, tandis que les [paragrapes 6.5](#) et [6.6](#) présentent des méthodes plus précises de mesurage direct des paramètres in-situ et en laboratoire.

Sample Document

get full document from standards.iteh.ai

Sample Document

get full document from standards.iteh.ai

Vibrations mécaniques — Vibrations et bruits initiés au sol dus à des lignes ferroviaires —

Partie 32: Mesurage des propriétés dynamiques du sol

1 Domaine d'application

La présente partie de l'ISO 14837 fournit des lignes directrices et définit des méthodes de mesure des propriétés dynamiques du sol par lequel les vibrations et les bruits initiés au sol sont transmis des lignes ferroviaires en exploitation aux fondations des bâtiments avoisinants. Le but est de déterminer les paramètres du sol qui permettront de prédire de manière fiable la transmission des vibrations et des bruits, de concevoir des lignes ferroviaires et des fondations conformes aux exigences acoustiques et vibratoires, de mettre en œuvre des mesures de prévention et de valider les méthodes de conception.

2 Références normatives

Les documents ci-après, dans leur intégralité ou non, sont des références normatives indispensables à l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

ISO 14837-1:2005, *Vibrations mécaniques — Vibrations et bruits initiés au sol dus à des lignes ferroviaires — Partie 1: Directives générales*

3 Symboles

Les symboles suivants sont utilisés dans la présente partie de l'ISO 14837.

NOTE Les abréviations sont récapitulées dans l'[Annexe A](#).

B	constante sans dimension dans l'équation relative à $G_{\max}$
D	facteur d'atténuation lié aux pertes en fonction de la distance
d	distance parcourue par une onde
$E_{\max}$	module d'Young, valeur dynamique en faible déformation
e	indice d'interstice, $e = \varphi / (1 - \varphi)$
f	fréquence
G^*	module de cisaillement complexe
$G_{\max}$	module de cisaillement, valeur dynamique en faible déformation
$G_{\sec}$	module de cisaillement sécant, valeur dynamique
I_p	indice de plasticité
$K_{\max}$	module de compressibilité, valeur dynamique en faible déformation

k^*	nombre d'onde complexe
M^*	module confiné complexe
$M_{\max}$	module confiné, valeur dynamique en faible déformation
N_{60}	nombre de coups corrigé obtenu lors de l'essai de pénétration normalisé (SPT)
n	exposant de contrainte dans l'équation relative à $G_{\max}$
P	flux de puissance vibratoire
p_a	contrainte de référence (pression), $p_a = 100$ kPa
Q	facteur de qualité du matériau
Q_c	facteur de qualité de roche
q_t	résistance de pointe lors de l'essai de pénétration au cône (CPT)
R	distance radiale, oblique ou le long de la surface
R_0	distance radiale de référence, oblique ou le long de la surface
S_{PP}	spectre du flux de puissance de l'onde
S_r	degré de saturation
S_{vv}	densité spectrale de puissance de la vitesse vibratoire particulière
s_u	résistance au cisaillement non drainé
t	temps
V	célérité d'une onde indépendamment du type d'onde
$\bar{V}$	célérité moyenne d'une onde
V_p	célérité des ondes de compression
V_s	célérité des ondes de cisaillement
V_{eau}	célérité des ondes (acoustiques) dans l'eau
v	vitesse vibratoire particulière
v_0	vitesse vibratoire particulière à la distance de référence
v_{RMS}	valeur quadratique moyenne de la vitesse vibratoire particulière
W	énergie potentielle dans un cycle d'hystérésis
Z_p	impédance spécifique des ondes de compression planes
Z_s	impédance spécifique des ondes de cisaillement planes
z	coordonnée de profondeur, profondeur au-dessous de la surface du sol
α	exposant d'atténuation en fonction de la distance
γ_{cy}	déformation en cisaillement cyclique (dynamique)
Δt	intervalle de temps, différence de temps

ΔW	perte d'énergie dans un cycle d'hystérésis
ε_{cy}	déformation normale cyclique (dynamique)
ζ	degré d'amortissement critique (taux d'amortissement) d'un système à un seul degré de liberté (SDOF)
η	facteur de perte du matériau
η_p	facteur de perte du matériau pour les ondes de compression
η_s	facteur de perte du matériau pour les ondes de cisaillement
η_{max}	facteur de perte du matériau à très faibles déformations, dans une gamme linéaire
λ	longueur d'onde
λ_{max}	1 ^{re} constante de Lamé, valeur dynamique en faible déformation
μ_{max}	2 ^{ème} constante de Lamé, valeur dynamique en faible déformation
ν_0	coefficient de Poisson, valeur en faible déformation
ξ	taux d'amortissement, $\xi = \eta/2$
ρ	masse volumique apparente
$\rho_{minéral}$	masse volumique des grains minéraux
ρ_{eau}	masse volumique de l'eau
σ_{cy}	contrainte normale cyclique (dynamique)
$\sigma'_{moyenne}$	contrainte effective moyenne
σ'_v	contrainte normale verticale effective
τ_{cy}	contrainte de cisaillement cyclique (dynamique)
φ	porosité

4 Transmission des vibrations et des bruits initiés au sol

4.1 Généralités

Les vibrations et les bruits initiés au sol dus à des lignes ferroviaires sont transmis par le sol sous forme d'ondes mécaniques. La propagation des ondes est influencée à la fois par les paramètres géométriques tels que la forme, l'étendue et la stratification des divers milieux géologiques et par les propriétés dynamiques des matériaux du sol pris individuellement.

Pour déterminer l'influence des paramètres géométriques, il est nécessaire de comprendre les types d'ondes, les célérités et les impédances des ondes qui dépendent également des propriétés des roches et des sols concernés. L'atténuation en fonction de la distance des vibrations et des bruits initiés au sol dépend en grande partie des effets géométriques en plus de l'effet des mécanismes de perte dans les divers matériaux du sol.

Pour les vibrations et les bruits initiés au sol dus à des lignes ferroviaires, les déformations dynamiques qui apparaissent habituellement dans le sol sont essentiellement faibles et se situent dans la gamme où les matériaux se comportent de façon linéaire. L'hypothèse d'une propagation d'ondes élastiques est donc possible. Cependant, même pour ces petites déformations, les matériaux du sol présentent une certaine perte d'énergie interne qui se traduit par une contribution à l'atténuation en fonction de la

distance. Par conséquent, un comportement légèrement viscoélastique ou hystérétique décrit mieux les matériaux du sol que ne le ferait dans ce cas un comportement purement élastique.

Dans un milieu élastique, homogène et infini, il n'existe que deux types fondamentaux d'ondes: les ondes de dilatation (ondes p) et les ondes de cisaillement (ondes s). Pour les ondes de dilatation, les particules élémentaires ont un mouvement de va-et-vient dans la direction de propagation des ondes, tandis que pour les ondes de cisaillement, les particules élémentaires se déplacent perpendiculairement à la direction de propagation. Les ondes de cisaillement peuvent donc être polarisées dans divers plans, tandis que les ondes de dilatation (ondes p) ne sont pas polarisées. Un sol réel est loin d'être infini et homogène. Il a des surfaces libres et des interfaces entre diverses couches et milieux géologiques qui présentent des propriétés différentes. Dans ces couches et milieux géologiques, les ondes de dilatation et de cisaillement sont transmises, réfléchies et réfractées et interagissent également pour former divers types d'ondes résultantes telles que les ondes de surface et les ondes guidées le long des surfaces et des interfaces dans le sol. Ces ondes peuvent souvent véhiculer la majeure partie de l'énergie vibratoire et donc influencer sur l'atténuation en fonction de la distance. Les ondes de ce type sont en général dispersives, c'est-à-dire que les propriétés de propagation des vibrations peuvent varier considérablement avec la fréquence et la longueur d'onde.

Dans la mesure où ces types d'ondes complexes qui constituent le chemin de transmission des vibrations à travers un sol réel proviennent tous des deux ondes fondamentales, les données entrées nécessaires pour déterminer le champ d'ondes de transmission se limitent aux propriétés des matériaux du sol qui régissent ces ondes fondamentales, et de plus, à la manière dont ces propriétés sont distribuées à travers le sol. À partir de ces propriétés et de la géométrie de leur distribution dans les couches et les milieux géologiques le long du chemin de transmission, il est possible de déterminer, au moins théoriquement, l'ensemble du champ d'ondes. En pratique, des simplifications importantes sont en général nécessaires pour apporter des solutions raisonnables aux cas réels.

Pour des informations complémentaires sur ces points, se reporter à la Référence [105].

4.2 Vibrations et bruits initiés au sol — Effet de la fréquence

Les vibrations et bruits initiés au sol sont tous deux transmis à travers le sol et dans les bâtiments sous forme d'ondes vibratoires mécaniques. Les mêmes mécanismes physiques et les mêmes ondes fondamentales s'appliquent donc à la fois aux bruits et aux vibrations. La seule distinction porte sur la fréquence et donc sur la longueur d'onde. Conformément à l'ISO 14837-1, la gamme de fréquences appropriée des vibrations initiées par le sol dues à des lignes ferroviaires est définie comme étant la gamme de perception des vibrations transmises à l'ensemble du corps, qui est comprise entre 1 Hz et 80 Hz (voir l'ISO 8041). La gamme de fréquences appropriée des bruits initiés au sol dus à des lignes ferroviaires se situe dans le domaine des fréquences audibles; l'ISO 14837-1 considère que cette gamme est comprise entre 16 Hz et 250 Hz environ. Les bruits initiés au sol sont réémis sous forme d'ondes acoustiques par les surfaces des bâtiments entrant en vibration, tandis que les vibrations initiées au sol sont transmises à l'ensemble du corps essentiellement par les planchers soumis aux vibrations. En plus des effets affectant les personnes, les vibrations initiées au sol peuvent avoir également un effet sur les installations sensibles et même sur les structures des bâtiments.

Bien que la physique de la propagation des ondes soit identique, les effets géométriques, les ondes secondaires et les mécanismes de perte dominant la transmission par le sol des vibrations mécaniques et conduisent à des propriétés de transmission dépendantes de la fréquence. Ainsi, la transmission des bruits initiés au sol sur un site donné peut être considérablement différente de la transmission des vibrations basses fréquences.

5 Paramètres relatifs à la propagation des ondes dans le sol

5.1 Généralités

L'Article 5 donne un aperçu général sur les paramètres les plus importants des matériaux pour la transmission des vibrations et des bruits initiés au sol et sur la manière dont ils sont théoriquement

composés et reliés entre eux. [L'Article 6](#) présente des méthodes pour quantifier ces paramètres par le biais d'estimations empiriques ou de mesurages.

5.2 Paramètres fondamentaux de propagation d'onde

Dans un solide élastique, isotrope et homogène, il peut exister deux sortes d'ondes de volume planes: l'onde de dilatation (onde p, onde de compression) et l'onde de cisaillement (onde s). La célérité V de ces ondes est liée au module de rigidité et à la masse volumique apparente (effective) du sol et de la roche à travers lesquels elles se propagent, selon les paramètres suivants:

a) célérité, V_p , de l'onde de dilatation:

$$V_p = \sqrt{\frac{M_{\max}}{\rho}} \quad (1)$$

b) célérité, V_s , de l'onde de cisaillement:

$$V_s = \sqrt{\frac{G_{\max}}{\rho}} \quad (2)$$

où

$M_{\max}$ est le module confiné élastique;

$G_{\max}$ est le module de cisaillement élastique du milieu;

ρ est la masse volumique apparente (effective).

En utilisant Pa comme unité pour les modules et kg/m³ pour la masse volumique, les vitesses de propagation des ondes issues de ces formules sont exprimées en m/s.

L'indice «max» est issu de la terminologie de la dynamique des sols et des roches. Il désigne la valeur du plateau stable maximal atteint pour les modules respectifs lorsque les déformations dynamiques sont suffisamment faibles pour que les matériaux du sol se comportent comme des matériaux linéairement élastiques. Pour des déformations plus importantes, la non-linéarité conduit à un module sécant réduit par rapport à cette valeur maximale. Il est indispensable de faire la distinction entre ces modules dynamiques et les modules destinés à être utilisés en mécanique statique ou semi-statique classique des sols et des roches. Ces modules sont déterminés pour des contraintes (déformations) beaucoup plus élevées et pour des charges à plus long terme (permanentes) où la non-linéarité et le fluage jouent un rôle important. Cela conduit à des modules sensiblement plus faibles que leurs homologues dynamiques linéaires. L'application de modules statiques dans les calculs dynamiques des sols et des roches peut conduire à des résultats très incorrects.

Les propriétés de déformation d'un milieu élastique isotrope sont en général uniquement définies par deux paramètres élastiques indépendants. Il peut s'agir des paramètres $M_{\max}$ et $G_{\max}$. Si, à la place, on prend le coefficient de Poisson, ν_0 , comme second paramètre, le module confiné, $M_{\max}$, peut être exprimé à partir du module de cisaillement, $G_{\max}$, à l'aide de la [Formule \(3\)](#):

$$M_{\max} = \frac{2(1-\nu_0)}{1-2\nu_0} G_{\max} \quad (3)$$

Le coefficient de Poisson utilisé ici avec l'indice «0» est celui qui s'applique aux faibles déformations dynamiques en régime élastique linéaire et qui peut être sensiblement différent de son homologue quasi-statique utilisé en mécanique des sols et des roches.

La célérité de l'onde de dilatation, V_p , peut ensuite être exprimée à partir de la célérité de l'onde de cisaillement, V_s , et du coefficient de Poisson, ν_0 , à l'aide de la [Formule \(4\)](#):

$$V_p = \sqrt{\frac{2(1-\nu_0)}{1-2\nu_0}} V_s \quad (4)$$

La [Formule \(4\)](#) fait apparaître que V_p est toujours supérieur à V_s , c'est-à-dire $V_p > V_s$, et que V_p/V_s augmente considérablement lorsque ν_0 s'approche de 0,5.

Le coefficient de Poisson ν_0 peut être déterminé à partir des célérités des deux ondes de volume fondamentales, V_p et V_s , à l'aide de la [Formule \(5\)](#):

$$\nu_0 = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (5)$$

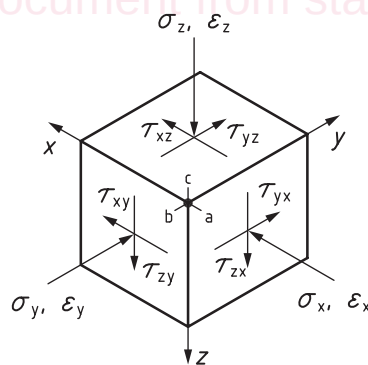
Si le module de Young $E_{\max}$ est utilisé en tant que second paramètre élastique, il est lié au module de cisaillement $G_{\max}$ et au coefficient de Poisson ν_0 selon la [Formule \(6\)](#):

$$E_{\max} = 2(1+\nu_0)G_{\max} \quad (6)$$

En variante, le module de compressibilité $K_{\max}$ peut être utilisé comme l'un des deux paramètres élastiques. Sa relation avec les autres paramètres est présentée ci-dessous:

$$K_{\max} = M_{\max} - \frac{4}{3}G_{\max} \quad (7)$$

La [Figure 1](#) spécifie les grandeurs de contrainte et de déformation ainsi que les axes de coordonnées dans le sol. La compression est positive, c'est-à-dire $\sigma > 0$. Le premier indice de la grandeur de cisaillement τ représente la direction et le second indice représente le plan.



Légende

- a plan x
- b plan y
- c plan z

$$\Delta\tau_{xy} = \Delta\tau_{yx}$$

$$\Delta\tau_{yz} = \Delta\tau_{zy}$$

$$\Delta\tau_{zx} = \Delta\tau_{xz}$$

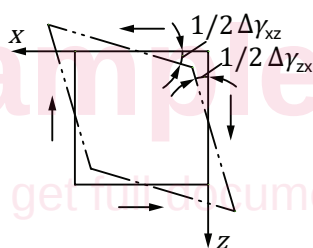
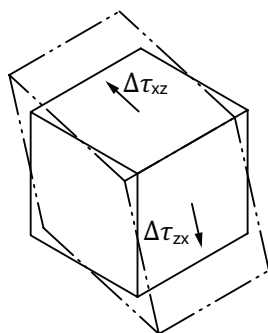
Figure 1 — Grandeurs de contrainte et axes de coordonnées dans le sol

La [Figure 2](#) illustre les modes de modification des contraintes et des déformations pour lesquels chacun de ces modules doit être appliqué. Les deux constantes de Lamé constituent un ensemble alternatif de paramètres élastiques.

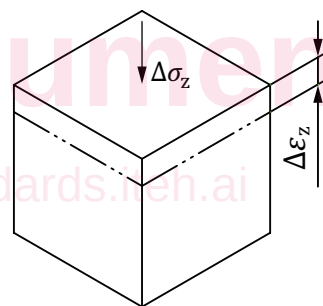
NOTE Les deux constantes de Lamé constituent un ensemble alternatif de paramètres élastiques. Ces constantes sont uniquement liées aux paramètres déjà définis. Lorsqu'elles sont utilisées pour des matériaux de sol et de roche, il est opportun d'indiquer les valeurs de plateau en faible déformation de ces paramètres en leur attribuant l'indice «max», même si cette pratique n'est pas courante. Les paramètres de Lamé sont reliés aux autres paramètres, selon les formules suivantes:

$$\lambda_{\max} = M_{\max} - 2G_{\max}$$

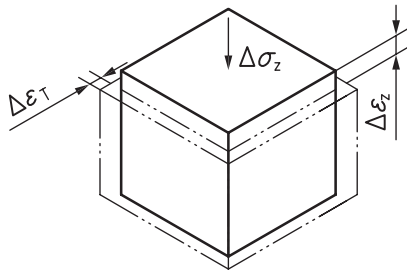
$$\mu_{\max} = G_{\max}$$



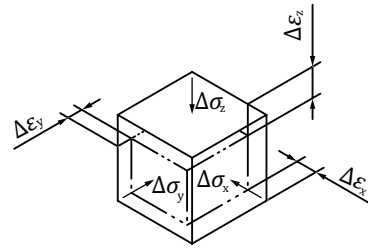
a) Module de cisaillement $G = \Delta\tau/\Delta\gamma$



b) Module confiné $M = \Delta\sigma_z/\Delta\epsilon_z$



c) Module d'Young $E = \Delta\sigma_z / \Delta\epsilon_z$



d) Module de compressibilité $K = \Delta p / \Delta\epsilon_{vol}$

NOTE 1 Dans les illustrations présentées, la direction z est la direction active. Les définitions s'appliquent également en prenant la direction x ou la direction y comme direction active.

NOTE 2 $\Delta\tau_{xz} = \Delta\tau_{zx} = \Delta\tau$, $\Delta\gamma_{xz} = \Delta\gamma_{zx} = \Delta\gamma$.

NOTE 3 Côtés confinés $\Delta\epsilon_x = \Delta\epsilon_y = 0$, pas de déformation transversale.

NOTE 4 $\Delta\epsilon_x = \Delta\epsilon_y = \Delta\epsilon_T$, côtés libres $\Delta\sigma_x = \Delta\sigma_y = 0$, coefficient de Poisson $\nu = \Delta\epsilon_T / \Delta\epsilon_z$.

NOTE 5 $\Delta\sigma_x = \Delta\sigma_y = \Delta\sigma_z = \Delta p$, $\Delta\epsilon_x + \Delta\epsilon_y + \Delta\epsilon_z = \Delta\epsilon_{vol}$.

Figure 2 — Constantes élastiques et modes de déformation associés pour un sol isotrope

L'impédance spécifique des matériaux du sol et les différences d'impédance entre matériaux constituent des paramètres importants pour l'évaluation de la quantité d'énergie des ondes transférée aux interfaces, d'un milieu vers un autre pour la formation d'ondes d'interface le long des limites entre milieux géologiques. Il est toutefois primordial de savoir que, pour des couches minces, par rapport à la longueur d'onde de vibration, c'est plutôt la rigidité de la couche, et non les différences d'impédance, qui régit la réflexion et la transmission des vibrations. Cela est particulièrement important pour l'évaluation de l'effet des écrans d'isolation vibratoire.

Les impédances spécifiques, Z , pour les ondes planes dans un milieu élastique et isotrope sont définies comme suit:

a) impédance spécifique, Z_p , pour ondes de dilatation planes:

$$Z_p = \rho V_p = \sqrt{\rho M_{\max}} \quad (8)$$

b) impédance spécifique, Z_s , pour ondes de cisaillement planes:

$$Z_s = \rho V_s = \sqrt{\rho G_{\max}} \quad (9)$$

L'inverse de l'impédance spécifique est désigné par le terme « admittance spécifique » et peut être utilisée alternativement.

L'impédance spécifique est exprimée en $\text{Pa}/(\text{m/s})$ et relie la contrainte dynamique (contrainte cyclique) dans une onde propagative à la vitesse particulière correspondante. Une onde de cisaillement plane avec une vitesse particulière, v , qui se propage dans un milieu présentant une impédance spécifique d'onde

de cisaillement, Z_s , impose une contrainte de cisaillement dynamique, τ_{cy} , dans le plan de polarisation de l'onde, donnée par la [Formule \(10\)](#):

$$\tau_{cy} = Z_s v \quad (10)$$

La déformation de cisaillement correspondante, γ_{cy} , est exprimée comme suit:

$$\gamma_{cy} = \frac{v}{V_s} \quad (11)$$

Des relations correspondantes s'appliquent pour la contrainte normale, σ_{cy} , et pour la déformation normale, ε_{cy} , dans la direction de propagation d'une onde de dilatation avec une vitesse particulière v :

$$\sigma_{cy} = Z_p v \quad (12)$$

$$\varepsilon_{cy} = \frac{v}{V_p} \quad (13)$$

Les [Formules \(10\)](#) à [\(13\)](#) s'appliquent seulement à une onde fondamentale se déplaçant dans une direction. Si un nombre plus important de composants interagissent comme dans les ondes stationnaires, les ondes de surface et les ondes d'interface, la superposition doit être considérée et les relations ci-dessus ne peuvent pas être appliquées immédiatement.

Le flux de puissance mécanique moyenne, P , en W/m², transmis dans la direction d'une composante d'onde plane fondamentale propagative à une fréquence pure, est exprimée comme suit:

$$P = \frac{1}{2} Z \hat{v}^2 \quad (14)$$

où

Z est l'impédance spécifique du sol pour le type d'onde en question;

$\hat{v}$ est l'amplitude de la vitesse particulière de cette composante en fréquence de l'onde.

De ce fait, pour la propagation de vibrations à large bande, la densité spectrale, S_{pp} , du flux de puissance est exprimée comme suit:

$$S_{pp}(f) = \frac{1}{2} Z S_{vv}(f) \quad (15)$$

où $S_{vv}(f)$ est la densité spectrale de puissance de la vitesse particulière de la vibration solidienne propagée par l'onde. En appliquant (m/s)²/Hz comme unité pour $S_{vv}(f)$, l'unité résultante pour $S_{pp}(f)$ est (W/m²)/Hz.

Pour une vibration à large bande avec une valeur quadratique moyenne (rms) de la vitesse particulière, v_{RMS} , le flux de puissance total P_{tot} est exprimé comme suit:

$$P_{tot} = \frac{1}{2} Z v_{RMS}^2 \quad (16)$$

Les événements vibratoires dues à des lignes ferroviaires sont transitoires et varient dans le temps. Lorsqu'il s'agit de valeurs représentatives des vitesses particulières, des déformations, des contraintes et de la puissance, des valeurs d'amplitude efficace mobiles dans le domaine temporel ou des valeurs spectrales mobiles peuvent être les plus appropriées comme cela est souligné dans l'ISO 14837-1:2005, 7.4. En outre, l'expérience a montré qu'une analyse par fenêtres temporelles mobiles de 1 s donnait les valeurs les plus représentatives pour l'évaluation de la performance dynamique des matériaux de sol et de roche.