

GUIDE POUR LA RÉALISATION D'ÉTUDES D'IMPACT VIBRATOIRE CAUSÉ PAR LES TRAVAUX DE CHANTIER

PHASES : TERRASSEMENT/ EXCAVATION/ STABILISATION

D'ËMWELTVERWALTUNG

Am Déngscht vu Mënsch an Ëmwelt



LE GOUVERNEMENT
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG
Ministère de l'Environnement, du Climat
et de la Biodiversité

Administration de l'environnement

GUIDE POUR LA RÉALISATION D'ÉTUDES D'IMPACT VIBRATOIRE CAUSÉ PAR LES TRAVAUX DE CHANTIER

version 1.2 du 4 avril 2024

TABLEAU 0.1: VERSIONS DU GUIDE

Version	Description	Organisme en charge	Statut de publication
1.0	Guide du 29.07.2021	Luxcontrol SA / Betavi s. à r.l.	Non publié
1.1	Guide du 14.08.2023	Administration de l'environnement	Non publié
1.2	Guide du 04.04.2024	Administration de l'environnement	04.04.2024

VERSION :

1.2

Le présent guide sera actualisé en cas de besoin.

Le Tableau 0.1 présente les différentes versions. Veuillez trouver la version la plus actuelle sur le site

<https://environnement.public.lu>

CONTACT

Administration de l'environnement

Unité Permis et Subsidés

Claude Haas (Claude.Haas@aev.etat.lu)

Dennis Grönlund (Dennis.Gronlund@aev.etat.lu)

1, avenue du Rock'n'Roll

L - 4361 Esch-sur-Alzette

Sommaire

1	Introduction	3
1.1	Avant-propos	3
1.2	Bases légales	3
1.3	Définition et application de la norme DIN 4150-2	4
1.3.1	Définition des paramètres et critères principaux extraits de la norme :	4
1.3.2	Valeurs de référence générales	6
1.3.3	Paramètres d'évaluation.....	6
1.3.4	Procédure d'évaluation générale.....	7
1.3.5	Valeurs de référence spécifique aux chantiers	8
1.3.6	Approche simplifiée	9
2	Méthodologie à appliquer dans le cadre de l'élaboration des études d'impact vibratoire	10
2.1	Programme de travail	10
2.2	Elaboration de l'étude.....	12
2.2.1	Description du projet.....	12
2.2.2	Normes d'applications	15
2.2.3	Méthodologie de calculs – principe général	15
2.2.4	Bâtiments spéciaux (hôpitaux, écoles, maisons de soin, etc.)	17
2.2.5	Cas des équipements sensibles	17
2.3	Bibliographie	19
3	Annexes.....	20

1 INTRODUCTION

1.1 AVANT-PROPOS

Le but de ce guide est de standardiser les méthodologies à appliquer par les personnes agréées [1] dans le cadre de l'élaboration des études d'impact vibratoire causé par les travaux de chantier (terrassement/excavation/stabilisation).

Ce guide fixe les règles dans l'application du point de compétence E3 (Études d'impact dans le domaine des vibrations). Il présente les informations et données requises pour d'élaboration d'études prévisionnelles de l'impact vibratoire causé par des travaux de chantier définis comme générant des vibrations substantielles dans les alentours immédiats.

À noter que le présent guide vise que les effets des vibrations sur les personnes dans les bâtiments en application de la norme DIN 4150-2 et les équipements sensibles dans les alentours du chantier. Les procédures et les exigences décrites dans le présent document ne s'appliquent donc pas aux effets sur les constructions (ensemble de l'ouvrage, planchers, canalisations enterrées) et le sol. Ce guide ne déroge pas à une planification et exécution des travaux de chantier de manière à éviter tout dommage aux constructions, aux installations et au sol dans les alentours du chantier.

1.2 BASES LÉGALES

La base légale pour l'évaluation de l'impact vibratoire des travaux de chantier se trouve dans la loi et le règlement suivant :

- Loi modifiée du 10 juin 1999 relative aux établissements classés [2].
 - Règlement grand-ducal modifié du 10 mai 2012 portant nouvelles nomenclature et classification des établissements classés [3].

Les versions actuelles à considérer ainsi que l'historique du développement des lois et règlements précités sont disponibles sur le site <http://www.legilux.lu/>.

Ce guide concerne principalement l'élaboration d'études d'impact vibratoire pour les *chantiers classés* dans le cadre de la loi modifiée du 10 juin 1999.

1.3 DÉFINITION ET APPLICATION DE LA NORME DIN 4150-2

Le domaine d'application de la norme DIN 4150-2 est l'évaluation des immissions de vibrations provenant de différentes sources sur les personnes dans les bâtiments.

Le présent chapitre reprend un résumé de ladite norme. Il reprend la procédure à appliquer lors de l'évaluation des nuisances vibratoires. Celle-ci est précédée par la définition des différents critères / indices à déterminer ainsi que les formules à appliquer (approche simplifiée) qui sont décrites dans la norme précitée. Des extraits de la norme viennent appuyer la description de la méthode appliquée.

1.3.1 DÉFINITION DES PARAMÈTRES ET CRITÈRES PRINCIPAUX EXTRAITS DE LA NORME :

Définition du signal vibratoire pondéré en fréquence $KB(t)$

L'équation (1) de la fonction de pondération du signal d'amplitude de la vitesse vibratoire en fonction de la fréquence est la suivante :

$$|H_{KB}(f)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (f_0/f)^2}} \quad (1)$$

Dabei ist:

f_0 5,6 Hz (Grenzfrequenz des Hochpasses);

f die Frequenz, in Hz.

Source : DIN 4150-2 : 1999-06, page 3

Définition du niveau de vibration pondéré $KB_\tau(t)$

La valeur efficace glissante du signal de vibration pondéré en fréquence est déterminée selon l'équation (2) :

$$KB_\tau(t) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_{\xi=0}^t e^{-\frac{t-\xi}{\tau}} \cdot KB^2(\xi) d\xi} \quad (2)$$

Die Zeitkonstante ist $\tau = 0,125$ s (siehe auch DIN 45669-1).

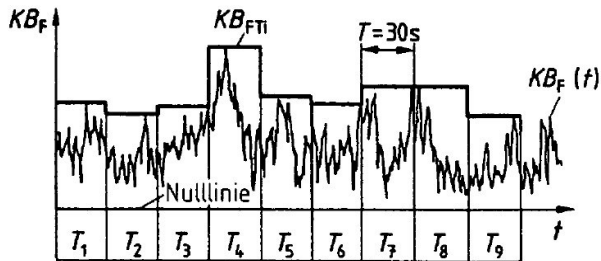
Als Formelzeichen für die bewertete Schwingstärke wird bei Verwendung von $\tau = 0,125$ s verwendet: $KB_F(t)$.

Source : DIN 4150-2 : 1999-06, page 3

Définition du niveau de vibration pondéré maximal KB_{Fmax} : La valeur maximale de $KB_F(t)$ qui se produit au cours de la période d'évaluation et qui est imputable à l'évènement à examiner.

Définition de la valeur maximale du cycle KB_{FTI} : Niveau maximal du cycle (selon terminologie allemande : Der Takt).

Le temps de mesure est divisé en cycles de $T = 30$ s chacun. Chacun de ces cycles se voit attribuer la valeur maximale des vibrations évaluées $KB_F(t)$ atteinte pendant la durée d'observation (voir figure 1 extrait de la norme ci-dessous).



t Zeit
 T Taktzeit

Bild 1: Ermittlung der Taktmaximalwerte KB_{FTi}

Source : DIN 4150-2 : 1999-06, page 3

Définition du KB_{FTm} : Valeur efficace maximale KB_{FTm}

La valeur KB_{FTm} est définie comme étant la racine carrée de la moyenne quadratique des valeurs maximales du cycle KB_{FTi} selon l'équation suivante (3)

$$KB_{FTm} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N KB_{FTi}^2} \quad (3)$$

Dabei ist:

N die Anzahl der Takte.

Source : DIN 4150-2 : 1999-06, page 3

Détermination de l'évaluation des vibrations KB_{FTr} :

La valeur KB_{FTr} est définie selon les équations suivantes (4a) et (4b)

$$KB_{FTr} = \sqrt{\frac{1}{T_r} \sum_j T_{e,j} KB_{FTm,j}^2} \quad (4a)$$

$$KB_{FTr} = KB_{FTm} \sqrt{T_e/T_r} \quad (4b)$$

Dabei ist:

T_r die Beurteilungszeit (tags 16 h, nachts 8 h);

T_e die Einwirkungszeit außerhalb von Ruhezeiten;

$T_{e,j}$ die Teileinwirkungszeiten außerhalb von Ruhezeiten;

KB_{FTm} und $KB_{FTm,j}$ der (die) Taktmaximal-Effektivwert(e) nach Gleichung (3), die für die Einwirkungszeit T_e oder Teileinwirkungszeiten $T_{e,j}$ repräsentativ sind.

Source : DIN 4150-2 : 1999-06, page 6

1.3.2 VALEURS DE RÉFÉRENCE GÉNÉRALES

Le tableau ci-dessous (« Tabelle 1 » de la norme DIN 4150-2), indique les valeurs de référence (A_u , A_o et A_r) pour l'évaluation des immissions de vibrations qui se produisent à l'intérieur des bâtiments, locaux ou peuvent séjourner des personnes susceptibles d'être soumises aux vibrations et des locaux similaires :

Tabelle 1: Anhaltswerte A für die Beurteilung von Erschütterungsimmissionen in Wohnungen und vergleichbar genutzten Räumen

Zeile	Einwirkungsort	Tags			Nachts		
		A_u	A_o	A_r	A_u	A_o	A_r
1	Einwirkungsorte, in deren Umgebung nur gewerbliche Anlagen und gegebenenfalls ausnahmsweise Wohnungen für Inhaber und Leiter der Betriebe sowie für Aufsichts- und Bereitschaftspersonen untergebracht sind (vergleiche Industriegebiete BauNVO, § 9).	0,4	6	0,2	0,3	0,6	0,15
2	Einwirkungsorte, in deren Umgebung vorwiegend gewerbliche Anlagen untergebracht sind (vergleiche Gewerbegebiete BauNVO, § 8).	0,3	6	0,15	0,2	0,4	0,1
3	Einwirkungsorte, in deren Umgebung weder vorwiegend gewerbliche Anlagen noch vorwiegend Wohnungen untergebracht sind (vergleiche Kerngebiete BauNVO, § 7, Mischgebiete BauNVO, § 6, Dorfgebiete BauNVO, § 5).	0,2	5	0,1	0,15	0,3	0,07
4	Einwirkungsorte, in deren Umgebung vorwiegend oder ausschließlich Wohnungen untergebracht sind (vergleiche reines Wohngebiet BauNVO, § 3, allgemeine Wohngebiete BauNVO, § 4, Kleinsiedlungsgebiete BauNVO, § 2).	0,15	3	0,07	0,1	0,2	0,05
5	Besonders schutzbedürftige Einwirkungsorte, z. B. in Krankenhäusern, Kurkliniken, soweit sie in dafür ausgewiesenen Sondergebieten liegen.	0,1	3	0,05	0,1	0,15	0,05

In Klammern sind jeweils die Gebiete der Baunutzungsverordnung BauNVO angegeben, die in der Regel den Kennzeichnungen unter Zeile 1 bis 4 entsprechen. Eine schematische Gleichsetzung ist jedoch nicht möglich, da die Kennzeichnung unter Zeile 1 bis 4 ausschließlich nach dem Gesichtspunkt der Schutzbedürftigkeit gegen Erschütterungseinwirkungen vorgenommen ist, die Gebietseinteilung in der BauNVO aber auch anderen planerischen Erfordernissen Rechnung trägt.

Source : DIN 4150-2 : 1999-06, page 6

Ces niveaux représentent les niveaux vibratoires de référence KB à respecter dans le cadre d'exposition permanente et dans tous les cas de figure (hors chantier considérés comme des expositions transitoires et momentanées). Pour le cas des expositions aux vibrations des personnes séjournant dans les bâtiments dans les alentours immédiats des chantiers, les valeurs de référence indiquées dans le tableau « Tabelle 2 » de la norme (voir chapitre 1.3.5 ci-dessous) doivent être respectées.

1.3.3 PARAMÈTRES D'ÉVALUATION

Dans le cadre de l'évaluation des niveaux vibratoires à l'immission, il existe deux paramètres d'évaluation :

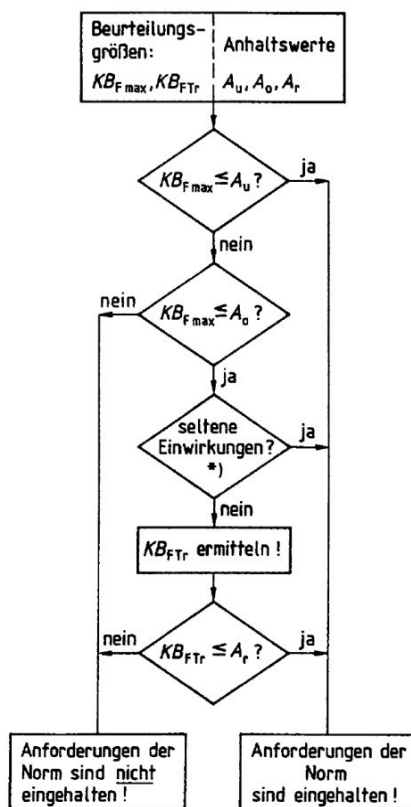
- le niveau de vibration pondéré maximal $KB_{F_{max}}$ (suivant le chapitre 3.5.2 de la norme),
- le niveau d'évaluation des vibrations $KB_{F_{Tr}}$ (suivant les chapitres 3.8 et 6.4 de la norme).

1.3.4 PROCÉDURE D'ÉVALUATION GÉNÉRALE

Dans la première étape, les paramètres d'évaluation (KB_{Fmax} et, si nécessaire, KB_{FTr}) doivent être déterminés pour les trois directions x, y et z. La plus grande de ces trois valeurs doit être comparée aux valeurs de référence A_u et A_o :

- Si le paramètre KB_{Fmax} est inférieur ou égal à la valeur d'arrêt A_u (inférieure), l'exigence de cette norme est remplie.
- Si le paramètre KB_{Fmax} est supérieur à la valeur de référence (supérieure) A_o , les exigences de cette norme ne sont pas satisfaites.
- Pour des effets à court terme peu fréquents, l'exigence de la norme est satisfaite si KB_{Fmax} est plus petit qu' A_o (voir chapitre 6.5.1 de la norme).
- Pour des effets fréquents pour lesquels le paramètre KB_{Fmax} est supérieur à A_u mais inférieur à A_o , il faut déterminer KB_{FTr} (voir chapitre 6.4 de la norme) et le comparer avec la valeur de référence A_r . Si le paramètre KB_{FTr} n'est pas supérieur à la valeur de référence A_r , les exigences de la norme sont également respectées.

La procédure d'évaluation est décrite et résumée par le grafctet (organigramme) suivant :



1.3.5 VALEURS DE RÉFÉRENCE SPÉCIFIQUE AUX CHANTIERS

Dans le cadre spécifique de l'évaluation des niveaux vibratoires KB concernant l'exposition aux vibrations des personnes séjournant dans les bâtiments dans les alentours immédiats des chantiers, la procédure d'évaluation décrite ci-avant est appliquée en considérant les valeurs de référence du tableau « Tabelle 2 » ci-dessous ceci pour des travaux diurnes d'une durée D ne dépassant pas des travaux de chantier de 78 jours maximum (travail). Pour une durée D supérieure à 78 jours, il convient de procéder à une évaluation individuelle en fonction du cas. Pour les travaux de nuit et les travaux effectués le dimanche et les jours fériés, les valeurs de référence de la « Tabelle 1 » de la norme sont applicables (voir chapitre 1.3.2 ci-dessus).

La durée D des effets de vibrations du tableau ci-dessous correspond au nombre de jours pendant lesquels les valeurs de référence de la « Tabelle 1 » de la norme sont dépassées (et non la durée de la construction elle-même). La valeur de référence déterminée à partir du tableau ci-dessous (« Tabelle 2 » de la norme) s'applique pour toute la durée du chantier.

Les différentes valeurs des critères à respecter conformément à la procédure décrite ci-dessus sont à comparer aux valeurs A_u , A_o et A_r suivantes (selon la terminologie allemande de la norme : *STUFE I* et *STUFE II* du tableau 2) :

Tabelle 2: Anhaltswerte A für Erschütterungseinwirkungen durch Baumaßnahmen außer Sprengungen

Dauer	$D \leq 1$ Tag			6 Tage < $D \leq 26$ Tage			26 Tage < $D \leq 78$ Tage		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Anhaltswerte	A_u	A_o *)	A_r	A_u	A_o *)	A_r	A_u	A_o *)	A_r
Stufe I	0,8	5	0,4	0,4	5	0,3	0,3	5	0,2
Stufe II	1,2	5	0,8	0,8	5	0,6	0,6	5	0,4
Stufe III	1,6	5	1,2	1,2	5	1,0	0,8	5	0,6

*) Für Gewerbe- und Industriegebiete gilt $A_o = 6$.

Source : DIN 4150-2 : 1999-06, page 9

Les différents „STUFE“ (niveaux) sont définis comme suit dans la norme :

- STUFE I (niveau I) : Niveaux considérés comme ne générant pas d'inconfort considérable.
- STUFE II (niveau II) : Niveaux ne générant pas d'inconfort considérable tant que les dispositions décrites dans le paragraphe 6.5.4.3 de la norme DIN4150-2 (mesures pour réduire l'inconfort allant de a) à e) et, si nécessaire, la mesure f) sont appliquées.
- STUFE III (niveau III) : niveaux au-delà desquels les effets sont inacceptables. Dans ce cas il sera nécessaire de convenir de mesures spécifiques adaptées à la situation allant au-delà des recommandations décrites dans le chapitre 6.5.4.3 de la norme DIN4150-2.

Le tableau « Tabelle 2 » ci-dessus ne s'applique pas aux objets nécessitant une protection particulière, comme par exemple les hôpitaux. Ces cas nécessitent des études et des accords spécifiques.

1.3.6 APPROCHE SIMPLIFIÉE

Il est possible de déterminer approximativement les grandeurs d'évaluation KB_{Fmax} et KB_{FTr} à partir d'enregistrements de la vitesse vibratoire $v(t)$, comme décrit dans le chapitre 7 de la norme.

La valeur maximale du signal de la vitesse vibratoire $v(t)$ en mm/s et la fréquence du signal en Hz doivent être déterminées. À partir de ces valeurs et des formules (6) et (7) de la norme, la valeur pondérée KB peut être calculée. En tenant compte du facteur de correction c_F du tableau « Tabelle 3 » ci-dessous la valeur de KB_{Fmax} peut être estimée.

Les différents critères KB sont définis par les formules suivantes :

Amplitude oscillatoire d'appréciation :

$$KB = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{v_{max}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_0}{f}\right)^2}} \quad \text{Formule (6) de la norme}$$

Source : DIN 4150-2 : 1999-06, page 10

Amplitude oscillatoire pondérée maximale :

$$KB^*_{Fmax} = KB \cdot c_F \quad \text{Formule (7) de la norme}$$

Source : DIN 4150-2 : 1999-06, page 10

Le choix du coefficient c_F (voir tableau ci-dessous) est à motiver par la personne agréée en charge de l'analyse. De même pour les données d'entrée du calcul : fréquence caractéristique du procédé, niveau de vitesse vibratoire v_{max} à l'endroit du site de réception.

Ces indices sont nécessaires pour effectuer les calculs des différents critères KB .

Sur base des hypothèses et paramètres nécessaires pour l'évaluation des niveaux vibratoires tels que définis ci-avant, les calculs de KB et de KB_{Fmax} sont à effectuer.

Tabelle 3: Erfahrungswerte für die Konstante c_F für verschiedene Arten von Erschütterungseinwirkungen

Zelle	Kurzbeschreibung der Einwirkungsart ¹⁾	c_F ²⁾
1	Harmonische Schwingungen mit geringen Verzerrungen (z. B. Sägewerke in großer Entfernung oder bei wesentlicher Resonanzbeteiligung)	0,9
2	Wie Zeile 1, jedoch stärker verzerrt — mehr als etwa 20 % Verzerrungen (z. B. Sägewerke in enger Nachbarschaft, wenn noch mehrere Oberschwingungen vorhanden sind)	0,8
3	Stochastische Schwingungen und periodische Vorgänge mit Schwebungen a) mit Resonanzbeteiligung (z. B. Webereien, Rammen, gemessen auf mitschwingenden Wohnungsfußböden); b) ohne Resonanzbeteiligung (z. B. auf nicht unterkellerten Wohnungsfußböden)	0,8 0,7
4	Einzelereignisse kurzer Dauer a) mit Resonanzbeteiligung b) ohne Resonanzbeteiligung	0,8 0,6

1) Die Einordnung einer Messung in eine dieser Klassen sollte nach dem Bild der Schwingungsaufzeichnung erfolgen. Die genannten Beispiele sollten nur eine Orientierung geben, in welchen Situationen die einzelnen Klassen der Erschütterungseinwirkung häufig anzutreffen sind.
2) Die Werte für c_F sind mittlere Erfahrungswerte. Abweichungen von etwa $\pm 15\%$ können auftreten.

Source : DIN 4150-2 : 1999-06, page 10

2 MÉTHODOLOGIE À APPLIQUER DANS LE CADRE DE L'ÉLABORATION DES ÉTUDES D'IMPACT VIBRATOIRE

2.1 PROGRAMME DE TRAVAIL

L'établissement du programme de travail est la première phase de l'élaboration d'une étude d'impact vibratoire. Il doit permettre à l'Administration de l'environnement de rendre un avis sur le déroulement de l'étude et sur les paramètres retenus pour la détermination de l'impact vibratoire.

La personne agréée doit soumettre le programme de travail à l'Administration de l'environnement pour approbation au plus tard un mois avant la réalisation de l'étude. Le programme de travail doit comporter, au minimum, les éléments suivants :

- Éléments obligatoires :

Afin de garantir une traçabilité adaptée le programme de travail doit comprendre un numéro de référence spécifique pour la réalisation du dossier (usage interne), le rappel de l'objet de la mission y compris le numéro de dossier présenté par l'autorité compétente lorsqu'il est existant (exemple : demande d'informations complémentaires, etc.), la date de réalisation du programme de travail et le nom de l'auteur de l'étude d'impact.

- Définition du contexte et description détaillée du projet :

Cette partie doit permettre d'identifier clairement le type et la nature du projet pour lequel des travaux de chantier pouvant générer des vibrations sont nécessaires. Une description de l'ampleur du chantier est obligatoire afin de définir quel est l'objectif et la nature des travaux à réaliser. L'emplacement, la situation géographique ainsi qu'une description des alentours immédiats est à indiquer dans le document à faire approuver par l'Administration de l'environnement. En résumé la description du projet doit contenir les éléments suivants :

- Localisation du projet, son objet, sa destination,
- Description du projet, accompagnée d'une carte topographique, d'une photographie aérienne, de plans du projet (plans de terrassement, de stabilisation et d'excavation, ...),
- Nature des travaux (terrassement, excavation, stabilisation, etc.),
- Description du voisinage immédiat,
- Identification et localisation des points de contrôle (points d'immission) sur un plan de situation,
- Description des outils utilisés sur le chantier, description des chemins de propagation, description de la structure du bâtiment contrôlé, etc.),
- Description qualitative et succincte des caractéristiques des vibrations produites par les procédés mobilisés (typologie, durée, amplitude, etc.),
- Formulation des hypothèses sur lesquelles s'appuie l'élaboration de l'étude d'impact comprenant les conditions de propagation vibratoire, nature des milieux de propagation,

interaction sur la structure/bâti, les caractéristiques vibratoires choisies pour les procédés, niveaux de sensibilité attaché à la destination du site de réception,

- Indication et description de la méthodologie utilisée au regard de la présence éventuelle d'équipements sensibles aux vibrations (exemple : équipements informatiques, serveurs et équipements informatiques, équipements de mesures médicaux, équipements de mesure à haute sensibilité, etc.),
- Évaluation des conditions de recouvrement entre procédé utilisé pour chaque phase d'exécution (simultanéité d'utilisation d'outils, calculs réalisés pour chaque procédé séparément, etc.),
- Normes utilisées et calculs appliqués,
- Valeurs limites fixées.

- **Normes à appliquer dans le cadre de l'évaluation de l'impact vibratoire :**

Une liste et une énumération des normes d'application si différentes et en complément de la norme DIN 4150-2 sont à indiquer dans le cadre de l'introduction du programme de travail afin de définir le cadre de la réalisation de l'étude prévisionnelle.

- **Méthodes de calculs :**

Les méthodes de calcul employées pour l'évaluation de l'impact vibratoire, doivent être détaillées. À titre d'exemple, plusieurs critères peuvent être calculés dans le cadre de l'évaluation de l'incidence des vibrations dans le voisinage (V_{m-peak} et KB aux fondations, V_{m-peak} et KB aux étages, types de vibrations sous forme d'ondes de Rayleigh et/ou d'ondes volumiques, etc.). Il est important de faire référence aux normes appliquées pour le calcul des différents critères nécessaires pour juger de la situation et de présenter les résultats de calculs intermédiaires utiles à l'obtention du résultat final en vue, le cas échéant, d'un contrôle à faire établir si nécessaire selon le besoin formulé par l'autorité compétente.

- **Définition des sources vibratoires :**

Les hypothèses retenues dans le cadre des calculs à effectuer concernant les sources qui seront en présence doivent être présentées dans le document. Ces hypothèses sont déduites sur base des documents et des informations fournies par les représentants du projet en question (engins de chantier, planning, plans, localisation du projet, etc.). Ces hypothèses sont fixées dans le programme de travail qui est soumis pour accord à l'Administration de l'environnement.

- **Description paramétrique des caractéristiques du milieu de propagation des ondes :**

Cette partie doit figurer dans le document à présenter à l'Administration de l'environnement. Elle doit contenir les informations nécessaires pour l'évaluation de la propagation des vibrations dans le sol. Un recensement détaillé des facteurs minorants / aggravants la propagation tel que des fissures, crevasses, couches et stratifications, compacité, changements de composition du sol, etc., est à fournir.

- Description détaillée des bâtiments récepteurs situés dans les alentours immédiats du site ou vont se produire les vibrations :

Cette partie doit contenir les informations nécessaires pour l'évaluation de la propagation des vibrations dans le bâtiment / récepteur. Des critères importants concernant la situation rencontrée tel que la vulnérabilité potentielle aux vibrations, la typologie d'usage, les transferts d'énergie vibratoire (fondations/étages) doivent être évalués afin d'appliquer des facteurs liés à la condition et spécificité du bâtiment / récepteur contrôlé.

Ces éléments doivent être présentés dans le programme de travail soumis pour validation concertée à l'Administration de l'environnement dans le cadre de l'évaluation des nuisances vibratoires liées aux activités de chantier.

2.2 ELABORATION DE L'ÉTUDE

Afin d'appréhender les paramètres de gêne de la manière la plus détaillée possible, la méthodologie « Étude » doit définir les critères suivants :

2.2.1 DESCRIPTION DU PROJET

2.2.1.1 Description des travaux à réaliser

Résumé général (voir tableaux en annexe) :

- Nom du projet,
- Maître d'ouvrage,
- Référence personne agréée,
- Envergure du projet : durée totale des travaux ayant un impact vibratoire et durée journalière des travaux,
- Volume d'excavation,
- Phasage comprenant type des travaux, durée de phases d'exécution, etc...,
- Rendement,
- Nature des travaux.

Une description détaillée du projet est à compléter dans le cadre de la réalisation des calculs de propagation. Afin d'élaborer une étude sur base d'hypothèses fournies, cette description doit contenir les éléments suivants :

- Résumé général du projet en particulier pour les phases concernées par les vibrations susceptibles d'être générées par ces travaux. Ce résumé doit contenir les différentes phases d'exécution du chantier comme indiqué ci-après (exemple) :
 1. Installations de chantier avec les travaux préparatoires pour les accès par exemple, etc.,
 2. Travaux de stabilisation des terres : description des procédés prévus d'être mis en place,
 3. Travaux de terrassement (y compris fondations si programmés) : les procédés utilisés doivent être décrits précisément (nombre d'engins, outils utilisés ainsi que paramètres, nombre d'engins simultanés, type d'engins si possible, etc.),

- Localisation précise (avec emprise du terrassement) ainsi que les zones concernées par les différentes activités de chantier prévues.
- Volumes des terres ou de la matière à terrasser, à déblayer, à excaver et à évacuer. Il est important de noter si certaines activités ont besoin de concasseur / cribleur par exemple. Une description succincte de la nature du terrain est à compléter dans cette partie (la description détaillée est définie dans le chapitre 2.2.1.3 ci-dessous).
- Nombre d'engins nécessaires afin de procéder aux différents travaux à exécuter. Ces informations permettront de justifier et d'argumenter les hypothèses retenues pour la planification du chantier.

Les volumes évalués d'évacuation des terres par le nombre de camions mis à disposition du chantier de terrassement devront aussi être justifié. Ces informations permettent aussi de justifier et d'argumenter sur la durée D nécessaires pour évaluer la durée de l'exposition aux vibrations du voisinage.

- Un planning de chantier. Celui-ci permettra de justifier de l'ensemble des données utilisées pour les calculs de propagation. De plus, ce document permettra de définir si des phases de recouvrement pourront avoir lieu lors de la réalisation des travaux. Le cas échéant, l'étude finale devra prendre en considération ces possibles événements.
- Horaires journaliers prévus pour la réalisation des travaux d'excavation (indiqués aussi jours ouvrables, jour et nuit, dimanches et jours fériés, etc.).

2.2.1.2 Description des lieux (chantier) et des alentours immédiats du site étudié (points récepteurs)

Les différentes hypothèses utilisées doivent être définies afin de permettre une comparaison la plus fine possible avec les critères proposés de la DIN 4150-2 permettant de définir les niveaux limites à respecter. Les hypothèses à intégrer sont résumées de la manière suivante :

1. Identification des points d'immission et/ou récepteur. Cette donnée doit permettre de définir l'emplacement du chantier par rapport aux alentours immédiats avec l'existence ou non de bâtiments dans lesquels peuvent séjourner des personnes de manière prolongée et/ou répétée (résidentiel, hospitalier, école, administration, bâtiment administratif, commerces, etc.) et/ou d'équipements sensibles. Cette donnée permet de définir les points sensibles à tenir compte dans le cadre de l'étude d'impact vibratoire. Représentation cartographique de la zone d'étude à l'aide d'un fond de carte adapté (carte topographique) sur laquelle sont représentés au minimum les délimitations de l'établissement / du chantier et les points récepteurs pertinents.
2. Description et type d'ouvrage / bâtiment existant à proximité immédiate du site avec sa localisation. Une description structurelle de l'ouvrage est à intégrer en définissant clairement les éléments de construction la composant (structure et enveloppe). Une qualification de la vétusté, incluant une description de l'état général du bâtiment est à indiquer. Celle-ci devra intégrer les particularités du bâtiment à contrôler dans le cadre de l'étude et particulièrement le nombre de sous-sol et d'étages, le type de fondation existante (si connue et identifiable, exemples : semelles filantes, fondations, radier, etc.). Un exemple de proposition est documenté en annexe (3) en appliquant une qualification ou une échelle de qualification de l'état général du bâtiment, etc.

3. Définition des points récepteurs sensibles du bâtiment. Cette information permet de définir avec précision les emplacements comme représentatif de la gêne perçue. En résumé, cette information doit permettre de définir les zones de vie du bâtiment où des tiers sont susceptibles de séjourner de manière continue ou prolongée y compris l'emplacement des équipements sensibles.

De plus, cette information permet aussi de définir avec plus de précisions la notion de sensibilité en fonction de la zone concernée. Par exemple, la sensibilité peut être accrue au niveau d'une chambre à coucher. Une différenciation de sensibilité peut être faite entre une chambre placée au 2^{ème} étage et au rez-de-chaussée.

Remarques :

Il est important de mettre en valeur les éléments manquants ou indisponibles dans le cadre de l'élaboration de l'étude afin de déterminer ultérieurement le niveau d'incertitude attaché à l'évaluation théorique dans le cadre de la qualification des niveaux de gênes liés aux phases présentées générant des vibrations.

Un tableau résumant les différents éléments demandés est à joindre à l'étude d'impact.

2.2.1.3 Description du milieu de propagation

Cette partie doit permettre d'évaluer les configurations du site et la nature du milieu de propagation existant entre les points sources et les ouvrages / bâtiments exposés aux nuisances vibratoires des activités de chantier. Les éléments importants nécessaires pour l'élaboration de l'étude sont principalement les paramètres et caractéristiques du sol présent entre les limites du chantier et les ouvrages alentours. L'étude géotechnique doit être un élément indispensable pour cette qualification du sol. Elle doit contenir les informations suivantes :

- Une classification selon la DIN 18300 est obligatoire. L'ancienne classification de la norme peut être utilisée (exemples : classes 6 et 7, remblais dans le cadre d'activité de compactage, etc.),
- Distances limites entre bords/fonds de fouille et éléments de fondation des bâtiments et ouvrages alentours,
- Particularités du site et du chemin de propagation entre les sources vibratoires et les zones de contrôle (points récepteurs). Cette partie permet de recenser les facteurs aggravants ou favorables à la propagation des vibrations dans le milieu. Les informations à fournir doivent renseigner sur l'existence de failles / fractures dans le sol, ouvrage enterré, topographie et altitude, pendage ou déclinaison, etc. et tout autre élément permettant de justifier et de quantifier les facteurs de propagation choisis.

2.2.1.4 Description des Sources / Émissions

Cette partie doit permettre de définir les activités à l'origine de gênes. Les informations minimales nécessaires à cette évaluation sont les suivantes :

1. Type et nature des travaux (installations de chantier, stabilisation, terrassement / excavation, compactage, etc.).

Limite des travaux concernés par l'étude d'impact vibratoire (citée ci-avant).

2. Nature de l'activité pouvant générer des vibrations (engins et outils avec paramétrages si possible).

Exemples :

- Forage à la tarière avec ou sans percussion (micropieux, pieux, pieux sécants, cloutage, reprises en sous-œuvre, caissons, etc.) lors de la stabilisation de la fouille,
 - Mise en place de palplanches (battage, vibro-fonçage, etc.),
 - Terrassement / excavation de la matière meuble et de la roche compacte (godet, brise roche hydraulique, ripper, ripper vibrant, fraisage, etc.),
 - Compactage (vibrant, dynamique, etc.).
3. Caractéristiques des outils / activités (dimensionnelles, forces appliquées, profondeur, nombre de pièces, rendement, etc.).

Ces caractéristiques doivent être mentionnées pour tous les types d'activités décrites dans le projet. Les descriptions des activités de terrassement / excavation du site doivent contenir aussi le volume de terrain à terrasser, le nombre d'engins susceptible d'être utilisé simultanément, etc. Le rendement est à fournir afin de s'assurer de la durée des phases du projet définie préalablement.

2.2.2 NORMES D'APPLICATIONS

L'évaluation des effets sur les personnes séjournant dans les bâtiments sera réalisée en application de la norme allemande DIN 4150-2: 1999-06 : « Erschütterungen im Bauwesen — Teil 2 : Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden ».

2.2.3 MÉTHODOLOGIE DE CALCULS – PRINCIPE GÉNÉRAL

Pour rappel, tout d'abord, il est préconisé de fixer des hypothèses de calcul concernant les différents éléments définis initialement et présentés ainsi que transmis à l'Administration de l'environnement dans le cadre de l'introduction du programme de travail (personne agréée). Ces hypothèses doivent être fixées sur base des éléments fournis par les différents partis (architectes, promoteurs, maître d'ouvrage, maître d'œuvre, etc.), étudiées et analysées par la personne agréée. Il est important de noter que la qualité et la fiabilité des données fournies auront une incidence directe sur les résultats de l'étude (tolérances, erreurs, etc.). Le cas échéant, la personne agréée devra évaluer, ou du moins informer l'Administration de l'environnement, de la fiabilité des données en sa possession afin de déterminer la marge d'erreur possible des calculs prévisionnels effectués. Afin de définir des hypothèses de départ les plus fidèles possibles pour la réalisation des calculs, une liste des hypothèses à utiliser est présentée comme suit :

2.2.3.1 Paramètres et critères concernant les locaux exposés et le chemin de propagation

Une liste des paramètres et des critères à fixer et à considérer pour l'élaboration de l'étude est présentée ci-après :

- Coefficient d'amortissement du sol,

- Vitesse de propagation des ondes dans le milieu,
- Valeurs d'entrées en fonction des activités/travaux de chantier avec argumentations et justifications ainsi que le type d'outil utilisé, etc.,
- Fréquences dominantes de propagation dans le milieu en fonction des activités de chantier ainsi que la nature des ondes propagées (sous forme de détermination de la longueur d'ondes),
- Terme correctif dépendant de la nature des vibrations (n),
- Distances (en fonction de la géométrie et de la topographie du site) et géométrie entre le point d'entrée et le point récepteur,
- Caractéristiques dimensionnelles du bâtiment voisin (si possible état des lieux avec rapport d'état des lieux préliminaire à fournir par un expert),
- Transfer des vibrations dans l'immeuble/résidence/maison (p. ex. la fonction de transfert, etc.),
- Détermination des fréquences propres du bâtiment contrôlé.

2.2.3.2 Définition de la durée des vibrations D

La durée effective des effets de vibrations (paramètre D de la norme DIN 4150-2) est à définir dans le cadre de l'étude d'impact vibratoire. Comme indiqué dans la norme ce paramètre doit correspondre à l'exposition totale aux vibrations aux points définis et validés par l'Administration de l'environnement comme points de contrôle (points récepteurs). Le détail et la définition de la prise en considération de ce paramètre sont indiqués dans la norme. Ce paramètre est défini sur base du nombre de jour pendant lequel les effets des vibrations au point récepteur se produisent réellement (et non la durée de la construction elle-même). Les jours avec des niveaux de vibration ne dépassant pas les valeurs respectives du tableau « Tabelle 1 » de la norme (voir tableau « Tabelle 1 » extrait de la norme DIN4150-2 au chapitre 1.3.2 ci-dessus) pour A_v ou A_r ne doivent pas être comptabilisés.

2.2.3.3 Détermination des critères liés au confort (KB)

À partir de l'ensemble des hypothèses fixées dans le cadre du programme de travail, les différents critères de confort KB peuvent être définis sur base des définitions de chacun des termes et de la méthode appliquée (approche simplifiée).

Pour rappel, l'approche simplifiée proposée dans la norme est ici recommandée afin de déterminer les différents niveaux des indices KB définis dans la norme DIN 4150 -2 : 1999-06 et dans le cadre de la réalisation d'une étude d'impact vibratoire effectuée sous agrément E3.

La procédure d'évaluation des différents paramètres et critères de confort KB est décrite au chapitre 1.3 et particulièrement au chapitre 1.3.6 de ce guide.

2.2.3.4 Comparaisons des critères KB et des valeurs de référence

Les critères de confort KB étant définis, les comparaisons aux valeurs de référence peuvent être effectuées comme suit :

- Évaluation des niveaux max « A_u » à ne pas dépasser pour ne pas enclencher la première phase de l'étude, $A_u = KB_{Fmax}$ (*proposition STUFE II –selon définition présentée au chapitre « 1.3.5 Valeurs de référence spécifique aux chantiers »*),
- Définition du facteur correctif ou d'ajustement à appliquer en fonction de la nature du bâtiment concerné,
- Si la valeur A_u est dépassée dans le calcul : il est nécessaire de fixer la valeur maximale à ne jamais dépasser (A_o). La valeur peut être exprimée sous forme de V_{max} ou KB_{Fmax} ,
- Évaluation du temps d'exposition maximum en fonction du procédé utilisé aux fondations, au point de contrôle le plus critique (souvent correspondant à l'étage le plus critique) afin de ne pas dépasser le critère A_r tel que défini dans le tableau « Tabelle 2 » - STUFE II de la norme,
- Combinaison des procédés – calculs des critères permettant d'évaluer la situation par combinaison de procédé en y associant à titre indicatif les distances entre engins simultanés, le nombre d'engins, le critère d'indépendance, etc.

2.2.4 BÂTIMENTS SPÉCIAUX (HÔPITAUX, ÉCOLES, MAISONS DE SOIN, ETC.)

Pour le cas des hôpitaux, cliniques, infrastructures de destination équivalente la « Zeile 5 » du tableau « Tabelle 1 » de la DIN 4150-2 est à prendre en compte pour les valeurs A_u , A_o et A_r (cf. tableau « Tabelle 1 » extrait de la norme DIN 41502 au chapitre 1.3.2). Les valeurs à respecter sont donc les suivantes :

- $A_u = 0,1$
- $A_o = 3$ (Attention aux équipements qualifiés de sensibles – voir chapitre 2.2.5 ci-dessous)
- $A_r = 0,05$

Une attention particulière devra être portée concernant la présence ou non d'équipements qualifiés de sensibles dans ces établissements. Dans ce cas, les valeurs limites doivent être adaptées en fonction de la sensibilité et des caractéristiques limites de fonctionnement de ces équipements (voir paragraphe 2.2.5 ci-dessous).

2.2.5 CAS DES ÉQUIPEMENTS SENSIBLES

Dans le cas spécifique des équipements sensibles aux vibrations, la norme DIN 4150-2 ne peut pas être appliquée. Concernant les équipements traditionnellement sensibles aux vibrations tels que racks informatiques type data center, local IT, local Telecom, équipements médicaux sensibles aux vibrations, le recensement, la localisation géographique et la collecte des données des fabricants des systèmes concernés est ici nécessaire. La définition d'un seuil vibratoire admissible doit être construite à partir de ces données tout en veillant à choisir les valeurs les plus faibles recensées. Le choix du descripteur (accélération, vitesse particulière) dépend des informations collectées. Toutefois la personne agréée doit indiquer lorsque nécessaire la transposition/conversion des valeurs à appliquer

selon un seul descripteur (vitesse particulière V_{\max} en mm/s) dans le cas de données exprimées selon d'autres descripteurs (accélération, ...), ceci pour faciliter l'homogénéisation des données utiles à la définition des seuils. À titre indicatif, en choisissant pour première approximation la production d'onde vibratoire quasi-périodique (sinusoïdale) par les procédés, il y a lieu d'appliquer la relation numérique connue entre vitesse particulière et accélération en connaissance des fréquences caractéristiques de chaque procédé employé pour les travaux (incluant les harmoniques, le cas échéant). En cas de combinaison de procédés, la valeur du seuil limite défini le plus faible pour ce groupe de procédés est ici applicable.

Toutes ces données et évaluation théorique des seuils admissibles doivent être reprises dans une note exhaustive complémentaire à l'étude d'impact relative au confort des personnes. Les calculs seront réalisés selon le même mode opératoire que celui décrit dans ce rapport concernant la définition des sources vibratoires, la nature du milieu de propagation, les conditions de couplage sol/structure (fondation) et propagation à l'intérieur du bâtiment.

2.3 BIBLIOGRAPHIE

- [1] Loi du 21 avril 1993 relative à l'agrément des personnes physiques ou morales privées ou publiques, autre que l'Etat, pour l'accomplissement de tâches techniques d'étude et de vérification dans le domaine de l'environnement.
- [2] Loi modifiée du 10 juin 1999 relative aux établissements classés.
- [3] Règlement grand-ducal modifié du 10 mai 2012 portant nouvelles nomenclature et classification des établissements classés.
- [4] DIN4150-2 - 1999-06 : Erschütterungen im Bauwesen - Teil2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden.

3 ANNEXES

TABLEAUX SYNOPTIQUES

Exemples

Nom du projet:

Date :

Référence personne agréée :

Maître d'ouvrage:

1 Identification Points de contrôle vibratoire calculé

Identifiant Point de contrôle	Bâtiment	Adresse	Localisation Site Point de contrôle calculé	Destination du Site Point de contrôle calculé
PC1	A	6 rue d'Arlon/Windhof	Sous-sol-2	Cave
PC2			Étage +3	Logement/chambre
PC3	B	3 Rue de l'industrie/Windhof	Sous-sol-1	Parking
PC4	C	18 Rue de l'industrie/Windhof	Étage/toiture	Comble aménagé
PC5	D	19 Rue de l'industrie/Windhof	Sous-sol-1	cave
PC6	E	21 Rue de l'industrie/Windhof	Sous-sol-1	cave

2 Configuration de site-

2.1 Nature du milieu (Établi sur base de l'étude de sol)

Identifiant Point de contrôle	Distance limite de fouille (m)	Profondeur minimum par Type de roche (classification selon DIN 18300) (en m)			Particularités de site-zone de travaux/Point de contrôle vibratoire					
		Grès/Marne (classe 6)	Grès /Marne (classe 7)	Mixte Grès/Marne (classe 6-7)	Couche avec pendage prononcé (1 à 2 axes)	Ouvrage enterré	Faïlle transversale/ Longitudinale	Orographie Altitude positive (sommet)	Orographie Altitude négative (dépression , vallée)	Autre (à préciser)
PC1	30	10	11							
PC2	25	10	12			X				
PC3	20	8	9							
PC4	25			4			X		X	
PC5	50		9				X			
PC6	50		9				X			

2.2 Nature du milieu/Compactage (Établi sur base de l'étude de sol et données équipements compactage si applicable)

Identifiant Point de contrôle	Distance limite du secteur compacté (en m)	Épaisseur de couche compactée (en m) par Type de sol			Installation de compactage					
		Enrobé/finition	Remblai	Autre	Nombre de passes (1)	Articulé/fixe monobille lisse	Articulé /Fixe tandem lisse	Articulé/fixe monobille pieds dameurs	Articulé /Fixe tandem Pieds dameurs	Autre (à préciser)
PC1	30	0.2	0.9							
PC2	25		1.0			X				
PC3	20		1.2							
PC4	25	0.5	0.1				X		X	
PC5	50									
PC6	50									

(1) établie en fonction de la vitesse de roulement moyenne du compacteur et de la distance la plus grande de la zone à compacter. Si Aller-retour à préciser et nombre de passe à multiplier par 2

Bâtiment industriel (Hall de production)																			
Commerces, centre commercial/shop																			
Centre de soin, Hôpital, CIPA																			
École, Bâtiment universitaire																			
Centre de recherche (public/privé) laboratoires																			
Autre (à préciser)																			

*** NC : DONNÉES INCONNUES-Partie 5.1 rubriques à renseigner en fonction des cas recensés**

- (1) Composition poutre acier/parement béton, poutre Bois/préfabriqué plâtre.. association de systèmes et matériaux différents par juxtaposition
- (2) Éléments de structures/Enveloppe du bâtiment avec doublage intérieur/extérieur ou les deux (laine minérale et ou couche isolation thermique rigide PUR (PIR, XPE,..)/couche d'étanchéité-membrane.+ parement plein ou perforé en maçonnerie, acier, aluminium, bois), association de systèmes et matériaux différents par superposition
- (3) Nombre d'étage à comptabiliser au-dessus du rez-de-chaussée/ En cas de présence d'un rez-de-jardin d'altitude différente au rez-de-chaussée choisir le niveau le plus bas en vis-à-vis de la limite de fouille la plus proche et comptabiliser le nombre d'étages superposés par rapport à ce niveau
- (4) Nombre de niveau de sous-sol à comptabiliser en-dessous du rez-de-chaussée/ En cas de présence d'un rez-de-jardin d'altitude différente au rez-de-chaussée choisir le niveau le plus bas en vis-à-vis de la limite de fouille la plus proche et comptabiliser le nombre de niveau de sous-sol par rapport à ce niveau
- (5) Échelle comprise entre 1 et 5 avec 1 : État vétuste/Fissuration avancée/Endommagement, 2 : État médiocre/Forte densité de Fissuration cosmétique taille millimétrique ou Faible densité fissuration structurelle taille centimétrique, 3 : État normal/Faible à moyenne densité de fissuration cosmétique taille millimétrique, 4 : État rénovation/Faible densité de fissuration cosmétique taille millimétrique, 5 : État Neuf sans fissuration apparente
- (6) : Type de fondation, N : Néant, F : Filante/semelle, P : Pieux/Pilotis

4 Équipements sensibles aux vibrations ⁽¹⁾

Identifiant Point de contrôle	Présence d'équipements sensibles aux vibrations	Exigences techniques					Aménagements spécifiques-Traitement antivibratoire			
		Seuil vibratoire ⁽²⁾	Fréquences ⁽³⁾ (Hz)	Mode de fonctionnement		NC *	Montage/support châssis antivibratoire	Chape flottante	Autre (à préciser)	NC*
	En fonction			Arrêt						
PC1	Scanner IRM SC3 t1	0.5 (v) 1.1 (v)	25-500 (s)	X			X			
	Balance Centrifugeuse	0.25 (a) 0.9 (a)	100-450 (sp)	X			X			
PC2	Data									X
PC4	Informatique							X		
PC6	Informatique									X

* NC : DONNÉES INCONNUES-Partie 5.2 rubriques à renseigner en fonction des cas recensés

(1) Sont visés les équipements sensibles tels que les appareils médicaux, ...

(2) Seuil vibratoire défini par le fabricant de l'équipement, grandeur exprimée en vitesse vibratoire (v) (mm/s) ou accélération (a) (g ou m/s²)

(3) Fréquences caractéristiques définies par le fabricant de l'équipement, (s) motif sinusoïdal, (sp) motif swept, (x) motif autre

5 Recensement des motifs d'incertitude-information type NC (donnée inconnue)

5.1 Bâtiment

Identifiant Point de contrôle	Structure/Enveloppe Bâtiment inconnue	Nombre de sous-sol inconnu	État général du bâtiment inconnu	Type de Fondations du bâtiment inconnu
	Motif(s)	Motif(s)	Motif(s)	Motif(s)
PC1	M1	M2	M3	M4
PC3		M5	M6	M7
PC5	M8	M9	M10	M11

5.2 Équipements sensibles aux vibrations

Identifiant Point de contrôle	Exigences techniques/type d'équipement inconnus	Aménagements spécifiques-Traitement antivibratoire inconnue
	Motif(s)	Motif(s)
PC2	M12	M13
PC4	M14	
PC6	M15	M16

Principe du calcul de la valeur KB_{Fmax} selon DIN 4150-2 (à l'endroit du site de mesure en fondation et à l'étage le plus élevé)

$$KB^*_{Fmax} = KB \cdot c_F$$

Évaluation théorique de KB_{Fmax} (étage N) à partir de la valeur KB_{Fmax} calculée en fondations

$$KB = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{v_{max}}{\sqrt{1 + \left(\frac{5.6}{f}\right)^2}} \times 0.8 \times K1_N \times K2_N \times K3_N$$

Avec :

f : fréquence caractéristique du procédé (motif vibratoire résultant de la transmission vibratoire sol/fondation) en Hz v_{max} : vitesse particulière, valeur crête de l'onde de volume (cisaillement-compression)/surface (Rayleigh) (selon les 3 directions x, y, z) sur fondations après interaction vibratoire sol/fondation

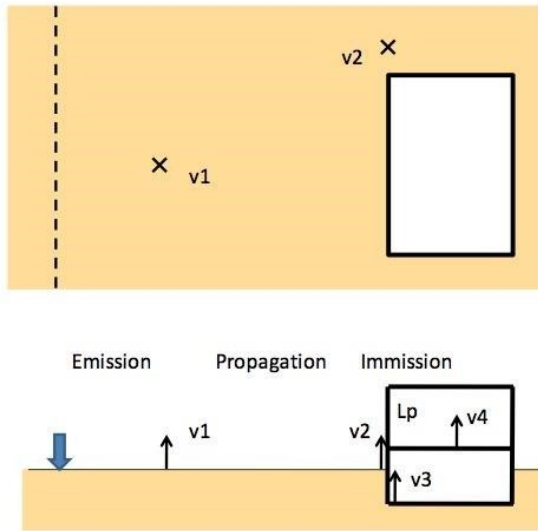
$K1_N$: facteur d'amplification vibratoire à l'étage N (le facteur d'amplification à prendre en compte à l'étage N et $K1_N = N \times K1$)

$K2_N$: facteur d'amortissement structurel vibratoire à l'étage N (le facteur d'amortissement à prendre en compte à l'étage N et $K2_N = N \times K2$)

$K3_N$: facteur d'état mécanique/vétusté à l'étage N

K1 : facteur d'amplification vibratoire par type de bâtiment et par étage

K2 : facteur d'amortissement structurel vibratoire par type de bâtiment et par étage



Calcul de V_{max} à partir des fonctions de transfert : v_2/v_1 , v_3/v_2 et v_4/v_3