

Approche d'une méthode prédictive de la transmission des vibrations dues aux activités de chantiers dans le cadre de la protection des bâtiments et riverains du proche environnement.

Ing. W. CHANG
Ing. J-P. LAHAYE
ECAM – Bruxelles

Les activités liées à l'exécution de chantiers engendrent des vibrations susceptibles d'avoir un impact sur la stabilité des constructions avoisinantes et le confort des riverains. Pour garantir l'intégrité des bâtiments alentours, les maîtres d'ouvrage exigent parfois la réalisation d'études préliminaires portant sur les vibrations émises par les activités de chantiers. L'objectif de cet article est de présenter une approche au développement d'une méthode permettant de prédire ces vibrations.

Mots-clefs : Transmission des vibrations, confort des riverains, chantier, prédiction des vibrations, nuisances.

Construction activities generate vibrations that can potentially impact the stability of nearby structures and the well-being of residents. To ensure the integrity of surrounding buildings, project stakeholders require preliminary analyses focusing on vibrations produced by construction activities. The aim of this article is to present an approach to the development of a method for predicting these vibrations.

Keywords : Vibration transmission, resident comfort, construction site, vibration prediction, and disturbance.

Symboles

- c_s : Vitesse de propagation des ondes secondaires [mm/s]
 E : Module de Young [Mpa]
 ν : Coefficient de poisson [-]
 ρ : Densité [kg/m^3]
 A : Amplitude maximale de la vibration du tambour ($0,4 \leq A \leq 1,72$) [mm]
 x : Distance mesurée le long de la surface du sol
 L_d : Largeur du tambour du rouleau vibrant ($0,75 \leq L_d \leq 2,2$) [m]
 n_d : Nombre de tambours vibrants ($1 \leq n_d \leq 2$) [-]
 k_s : Facteurs d'échelle (et probabilité de dépassement de la valeur prédite) [-]
 $k_s = 75$ (50%); $k_s = 143$ (33,3%); $k_s = 276$ (5%)
 k_t : Facteurs d'échelle (et probabilité de dépassement de la valeur prédite) [-]
 $k_t = 65$ (50%); $k_t = 106$ (33,3%); $k_t = 177$ (5%)
 W_h : Énergie potentielle d'un dameur soulevé ($1\ 000\ 000 \leq W \leq 12\ 000\ 000$) [J]
 k_v : Facteurs d'échelle (et probabilité de dépassement de la valeur prédite) [-]
 $k_v = 60$ (50%); $k_v = 126$ (33,3%); $k_v = 266$ (5%)
 δ : Exposant [-]
 $\delta = 1,3$ (toutes opérations); $\delta = 1,2$ (démarrage et arrêt); $\delta = 1,4$ (état stable)
 W : Énergie nominale du marteau ($1\ 500 \leq W \leq 85\ 000$) [J]
 L : Profondeur du pieu ($1 \leq L \leq 27$) [m]
 $r^2 = L^2 + x^2$ Distance entre la base du pieu et la distance mesurée [m]
 k_p : Facteurs d'échelle [-]
 a : Dimension de la source parallèle au sens de propagation [m]
 λ_R : Longueur d'onde des ondes de surface de Rayleigh [m]
 \bar{v} : Amplitude de la vitesse de vibration [mm/s]
 \bar{v}_1 : Amplitude de la vitesse de vibration à une distance R_1 [mm/s]
 R : Distance de la source [m]
 R_1 : Distance de la source correspondant au rayon de criticité [m]
 n : Exposant
 α : Coefficient d'atténuation [m^{-1}] qui vaut $\alpha \cong 2\pi D/\lambda$
 D : Facteur d'amortissement
 λ : Longueur d'onde pertinente [m]

1. Contexte

Le confort des riverains est souvent compromis par les nuisances environnementales, et en particulier les vibrations causées par les activités de chantiers. Ces vibrations peuvent se faire plus ou moins ressentir par les bâtiments environnants et leurs résidents, en fonction de la distance chantier-bâtiment, l'intensité des vibrations, le type de sol et bien d'autres facteurs. Elles peuvent également causer des dommages sur les structures qui peuvent aller d'une microfissure à un tassement du bâtiment. Afin de réduire les risques de l'effet des vibrations sur les structures avoisinantes pendant les travaux, il est envisageable de mettre en place des mesures de prévention et de surveillance.

Par ailleurs, l'approche idéale consisterait à intégrer la prise en compte des vibrations dès la phase initiale de conception du projet. C'est pourquoi la réalisation d'une étude préliminaire permettrait d'anticiper l'impact de certaines activités de chantier sur le proche environnement. A l'heure actuelle, certains bureaux d'études sont confrontés à une augmentation de demandes d'études vibratoires sans pour autant avoir les outils nécessaires.

Ce présent article est basé sur un travail de fin d'étude réalisé dans le cadre d'une recherche axée sur le développement d'une méthode et d'un outil permettant de répondre à cette demande.

2. Notions théoriques

Une vibration est un mouvement oscillatoire des couches du sol autour d'une position d'équilibre et sous l'effet d'une sollicitation. Ce système peut être assimilé à un système masse-ressort illustré sur la figure 2.1.

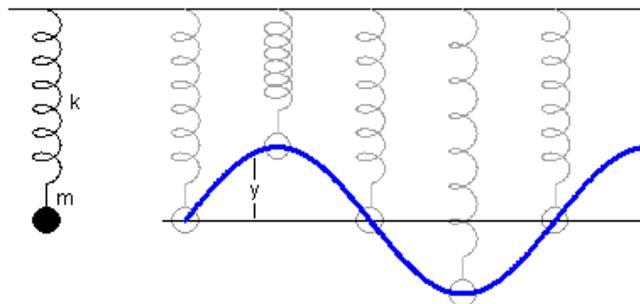


Figure 2.1: système masse-ressort (Wikipédia, 2006).

Les vibrations sont caractérisées par différents paramètres dont les principaux utilisés sont la fréquence et l'amplitude.

Les dégâts observés sur les structures proviennent de l'énergie vibratoire transmise depuis le sol jusqu'aux fondations. Cette énergie est générée sous forme d'ondes de différents types : les ondes de volume et les ondes de surface.

Les ondes de volume peuvent être des ondes primaires ou secondaires et se propagent respectivement parallèlement et transversalement à la direction de propagation des ondes.

Les ondes de surfaces sont des ondes de Love ou de Rayleigh, qui se propagent perpendiculairement aux ondes secondaires pour les ondes de Love tandis que les ondes de Rayleigh sont caractérisées par un déplacement elliptique complexe dû à l'interférence des ondes primaires et secondaires. La figure 2.2 résume ces 4 types d'ondes :

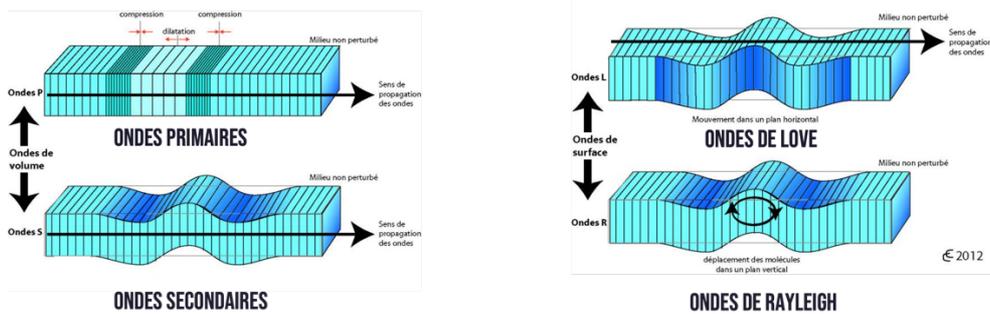


Figure 2.2: Différents types d'ondes.

Lors d'un séisme, ces différents types d'ondes peuvent être observés sur un sismogramme. Il démontre que les ondes primaires et secondaires apparaissent en premier tandis que les ondes de surfaces se font ressentir après un certain temps. La figure 2.3 permet de constater que l'amplitude des ondes de surface est supérieure à celle des ondes de volume, ce qui en fait les ondes les plus destructrices.

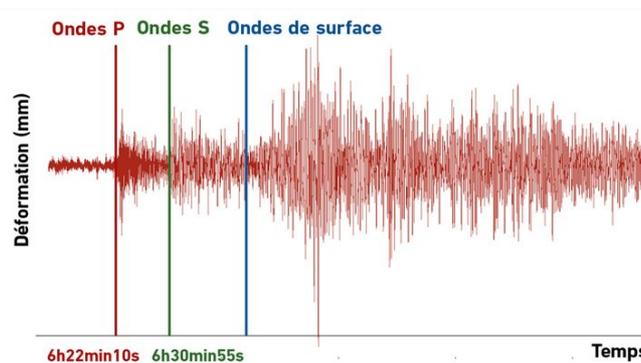


Figure 2.3: Sismogramme du séisme du Népal du 25 avril 2015.

En effet, les normes abordées dans la suite de cet article ne prennent en considération que les ondes de Rayleigh.

La dangerosité des vibrations est déterminée par la vitesse de propagation des ondes et leur longueur d'onde. Les différents paramètres qui permettent de les calculer sont :

- Le module de Young (E), qui mesure la rigidité d'un matériau et affecte la vitesse de propagation des ondes.
- Le coefficient de Poisson (ν), qui indique la capacité d'un matériau à se comprimer.
- La masse volumique (ρ), qui mesure la densité d'un matériau.

La vitesse de propagation des ondes de Rayleigh se calcule selon la formule approximative suivante [1] :

$$c_R \approx \frac{(0,87 + 1,12\nu)}{1 + \nu} * c_S \quad (1)$$

Elle dépend de la vitesse de propagation des ondes secondaires calculé grâce à la formule suivante :

$$c_S = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \nu)}} \quad (2)$$

3. Mesure des vibrations

Dans le cadre de campagnes de mesure de vibrations, plusieurs types d'appareils sont utilisables, comme les accéléromètres, les vélocimètres, les géophones ou les capteurs de déplacements. Parmi ceux-ci, les appareils employés au cours des prises de mesure pour ce travail, sont des accéléromètres et des géophones sismiques.

L'accéléromètre permet le traitement et la visualisation des signaux instantanément, ce qui garantit le bon fonctionnement de l'appareil et de la prise de mesure. Cependant, les résultats sont sensibles aux facteurs extérieurs et engendrent des signaux parasites, ce qui rend les résultats souvent moins précis.

Le géophone à capteurs sismiques offre un résultat très précis tout en étant un appareil de mesure robuste et adaptable à toutes les situations extérieures. Toutefois, les données collectées sont des données brutes qui nécessitent un traitement ultérieur.

4. Les normes

Il n'existe aucune norme nationale mais généralement c'est la norme allemande DIN 4150 qui est utilisée. Cette norme est divisée en 3 parties :

- DIN 4150 partie 1 (2001) [2] aborde des directives générales sur l'évaluation des vibrations et la prédiction de celle-ci.
- DIN 4150 partie 2 concerne les effets sur les personnes dans le bâtiment.
- DIN 4150 partie 3 (1999) [3] sur les effets sur les constructions et les seuils à respecter.

Une autre norme parfois abordée est la norme britannique BS 5228 [4] qui est en réalité un code de bonne pratique pour le contrôle des bruits et des vibrations. Elle contient également des données de mesures de vibrations sur terrain concernant les différentes activités de chantier qui causent le plus de vibrations.

La DIN 4150-1 permet de comprendre le calcul et la prédiction de la vitesse des vibrations afin que les résultats soient comparés aux seuils. Ces valeurs seuils sont énoncées dans la DIN 4150-3 et la BS 5228 en fonction du type de bâtiment et de la fréquence d'excitation. La figure 4.1 reprend les seuils de ces deux normes en fonction de la catégorie du bâtiment.

Catégorie 1 : Bâtiments à usage industriel, commerciale ou similaire en structure

Catégorie 2 : Construction mitoyenne

Catégorie 3 : Constructions sensibles (tout ce qui ne peut être classé dans les deux premières catégories).

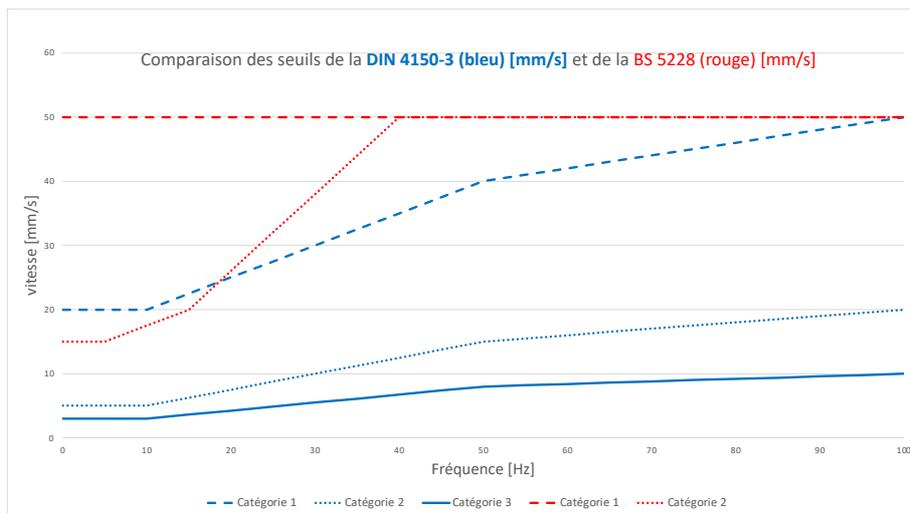


Figure 4.1: Seuils de la DIN 4150 (bleu) et la BS 5228 (rouge) en fonction du type de bâtiment.

5. Principales causes des vibrations sur les chantiers

La norme BS 5228 mentionne quelques activités de chantier qui engendrent des vibrations importantes. Les principales causes des vibrations sont illustrées sur la figure 5.1. et correspondent au déplacement et à l'utilisation des machines de chantiers, comme les pelles excavatrices, les marteaux hydrauliques et les camions ou tombereaux. La seconde catégorie de machines produisant des vibrations sont les compacteurs (dynamique, à plaque vibrante ou à rouleau), ils permettent l'amélioration de la qualité du sol. Enfin, les activités servant à la mise en œuvre des fondations produisent des vibrations qui peuvent être dangereuses, notamment le battage des pieux et le vibrofonçage.

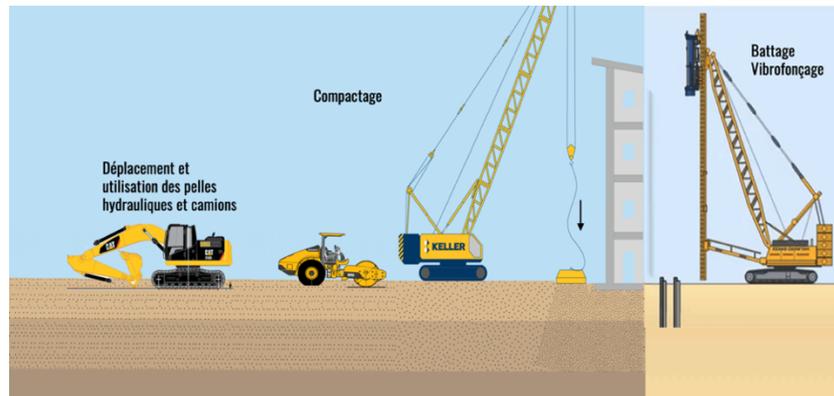


Figure 5.1: Les principales causes de vibrations sur chantier.

Les causes citées précédemment constituent les activités les plus récurrentes lors de la phase de construction. Cependant, la liste n'est pas exhaustive, il existe bien d'autres activités qui engendrent des vibrations importantes.

6. Méthodes de prédiction des vibrations.

Afin de réaliser des études vibratoires, il est nécessaire de prédire la vitesse de propagation des vibrations pour les comparer aux seuils donnés par les normes mentionnées au point 4. Pour prédire ces vibrations, plusieurs méthodes sont envisageables :

- Les lois expérimentales : L'exemple le plus répandu est la loi de Chapot utilisée lors de tirs de mine qui montre la décroissance de l'amplitude des vibrations en fonction de la distance. Toutefois, la loi de Chapot ne peut pas être utilisée dans l'analyse des vibrations générées par des chantiers plus communs (type bâtiments résidentiels), puisque cette loi repose sur une quantité d'explosif et néglige les propriétés géotechniques du sol.

- Les modélisations numériques permettent d'avoir des prédictions précises et sont employées pour des phénomènes très complexes qui nécessitent une analyse poussée. Les méthodes généralement utilisées sont celles des éléments finis et les méthodes par éléments frontières. Cependant, ces modélisations sont à réaliser au cas par cas et cela ne correspond pas à l'objectif de ce travail qui est de développer une méthode simple et adaptable, afin d'obtenir une approximation de l'impact des vibrations.
- Les méthodes introduites par les normes BS 5228 et DIN 4150-1 constituent les bases de la prédiction des vibrations de ce travail.

6.1. Propagation des vibrations selon la BS 5228 (annexe E)

L'Annexe E de la norme britannique BS 5228 présente des équations élaborées grâce à des campagnes de mesures sur site réalisées par Hiller et Crabb et issues des recherches menées par le Transport Research Laboratory.

6.1.1. La vitesse résultante du compactage par vibrations à un état stable [mm/s]:

$$V_{res} = k_s \sqrt{n_d} \left[\frac{A}{x + L_d} \right]^{1,5} \quad (3)$$

A : Amplitude maximale de la vibration du tambour ($0,4 \leq A \leq 1,72$) [mm]

x : Distance mesurée le long de la surface du sol ($2 \leq x \leq 110$) [m]

L_d : Largeur du tambour du rouleau vibrant ($0,75 \leq L_d \leq 2,2$) [m]

n_d : Nombre de tambours vibrants ($1 \leq n_d \leq 2$) [-]

k_s : Facteurs d'échelle (et probabilité de dépassement de la valeur prédite) [-]

$k_s = 75$ (50%) ; $k_s = 143$ (33,3%) ; $k_s = 276$ (5%)

6.1.2. La vitesse résultante du compactage par vibrations au démarrage et à l'arrêt [mm/s]:

Dans cette situation, la fréquence qui augmente au démarrage, diminue à l'arrêt et n'est donc pas dans un régime permanent. La norme fournit une nouvelle formule :

$$V_{res} = k_t \sqrt{(n_d)} \left[\frac{A}{(x + L_d)^{1,3}} \right]^{1,5} \quad (4)$$

x : Distance mesurée le long de la surface du sol ($2 \leq x \leq 110$) [m]

k_t : Facteurs d'échelle (et probabilité de dépassement de la valeur prédite) [-]

$k_t = 65$ (50%) ; $k_t = 106$ (33,3%) ; $k_t = 177$ (5%)

6.1.3. La vitesse résultante du compactage dynamique [mm/s]:

$$V_{res} \leq 0,037 \left[\frac{\sqrt{(W_h)}}{x} \right]^{1,7} \quad (5)$$

x : Distance mesurée le long de la surface du sol ($5 \leq x \leq 100$) [m]

W_h : Énergie potentielle d'un dameur soulevé ($1\,000\,000 \leq W \leq 12\,000\,000$) [J]

6.1.4. La vitesse résultante du vibrofonçage [mm/s]:

$$V_{res} = \frac{k_v}{x^\delta} \quad (6)$$

x : Distance mesurée le long de la surface du sol ($1 \leq x \leq 100$) [m]

k_v : Facteurs d'échelle (et probabilité de dépassement de la valeur prédite) [-]

$k_v = 60$ (50%) ; $k_v = 126$ (33,3%) ; $k_v = 266$ (5%)

δ : Exposant [-]

$\delta = 1,3$ (toutes opérations) ; $\delta = 1,2$ (démarrage et arrêt) ; $\delta = 1,4$ (état stable)

6.1.5. La vitesse résultante du battage des pieux [mm/s]:

$$V_{res} \leq k_p \left[\frac{\sqrt{W}}{r^{1,3}} \right] \quad (7)$$

x : Distance mesurée le long de la surface du sol ($1 \leq x \leq 111$) [m]

L : Profondeur du pieu ($1 \leq L \leq 27$) [m]

x : Distance mesurée le long de la surface du sol ($1 \leq x \leq 111$) [m]

$r^2 = L^2 + x^2$ Distance entre la base du pieu et la distance mesurée [m]

k_p : Facteurs d'échelle [-] est donné sur la figure 6.1 :

Conditions du sol	Valeur de k_p
Pieux battus jusqu'au refus	5
Pieux battus à travers : sols cohésifs très rigides, sols granulaires denses, remblais contenant des obstructions qui sont grandes par rapport à la section transversale du pieu.	3
Pieux battus pas à travers : sols rigides et cohésifs, sols granulaires moyennement denses, remblai compacté	1.5
Pieux battus à travers : sols cohésifs mous, sols granulaires lâches ou organique, remblai meuble	1

Figure 6.1: Valeur des k_p pour les pieux battus.

La BS 5228 fourni d'autres formules qui n'ont pas été reprises dans ce travail puisqu'elles concernent des cas précis d'activités de chantier (tirs de mines, tunneling...).

6.2. Propagation des vibrations selon la DIN 4150-1

L'amplitude des vibrations et la distance de propagation des vibrations sont des critères importants à considérer lors de l'étude de l'impact des vibrations sur les bâtiments environnants.

La DIN 4150-1 définit un rayon de criticité autour de la source de vibration, à l'intérieur duquel les ondes se comportent de manière complexe, tandis qu'au-delà de ce rayon, elles se propagent librement sans être influencées par la source d'origine. Ce rayon de criticité est calculé selon une formule donnée :

$$R_1 = \frac{a}{2} + \lambda_R \quad (8)$$

Le rayon de criticité peut être illustré par la figure 6.2 :

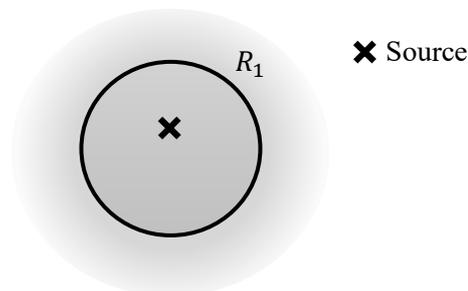


Figure 6.2: Représentation ondes de Rayleigh.

Au-delà du rayon de criticité ($R > R_1$), à mesure que la distance par rapport à la source augmente, l'énergie des ondes vibratoires diminue puisqu'elles subissent à la fois un amortissement géométrique et un amortissement du matériau. L'amortissement géométrique est lié à la décroissance de l'amplitude des vibrations due uniquement à la distance. L'amortissement du matériau concerne la capacité d'un matériau, notamment la couche de sol, à absorber et dissiper l'énergie vibratoire. Ainsi, pour des distances supérieures au rayon de criticité ($R > R_1$), l'amortissement de l'amplitude de la vitesse des vibrations peut être formulé comme suit :

$$\bar{v} = \bar{v}_1 \left(\frac{R}{R_1} \right)^{-n} \exp(-\alpha(R - R_1)) \quad (9)$$

Le terme $\left(\frac{R}{R_1}\right)^{-n}$ correspond à l'amortissement géométrique mentionné précédemment. La norme DIN 4150-1 propose de trouver l'exposant n grâce à la figure 6.2 qui est fonction de la géométrie de la source (linéaire ou ponctuelle), du type de vibration (stationnaire/harmonique ou impulsif) et du type d'onde (onde volumique ou onde de surface). (Exemple : compactage est PQ/HS/O donc $n = 0,5$ et battage PQ/I/R et $n = 1,5$ descendu à $n = 1$ pour être sécuritaire).

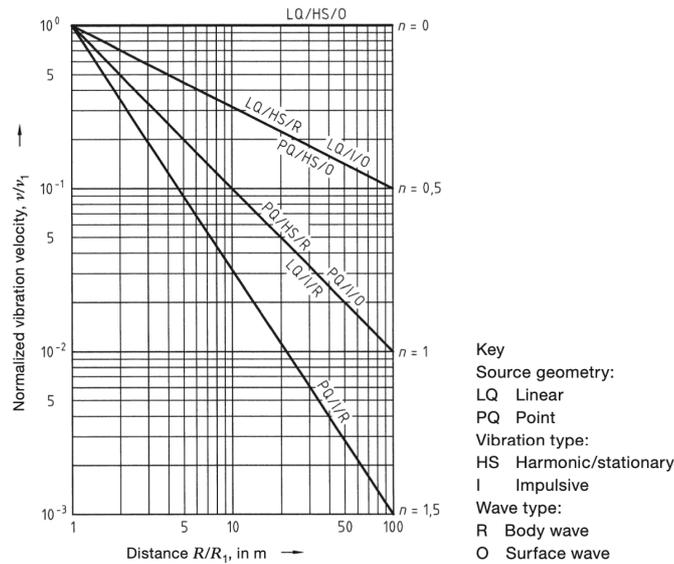


Figure 6.3: Détermination de l'exposant n selon différents facteurs.

Selon la norme DIN 4150-1, l'équation (9) est applicable uniquement lorsque ($R > R_1$) c'est-à-dire que la distance (R) à laquelle les résultats sont souhaités est supérieure au rayon de criticité (R_1). Autrement, lorsque la distance (R) est inférieure au rayon de criticité (R_1) la loi de propagation des vibrations est plus complexe. Par la suite, une méthode d'approximation sera présentée pour permettre l'utilisation de cette formule malgré ses limitations.

7. Développement de l'outil : prédiction des vibrations en fonction des activités de chantier.

Comme abordé précédemment, la norme BS 5228 permet de prédire les vibrations en fonction des activités de chantier qui peuvent être vérifiées grâce aux seuils définis par cette même norme.

Le principal inconvénient de cette norme britannique est qu'elle ne considère pas le type de sol dans lequel se propagent les vibrations, ce qui peut donner lieu à de

grosses imprécisions. C'est pourquoi, le type de sol est un paramètre qui ne peut être négligé pour être rigoureux.

8. Développement de l'outil : prédiction de l'amplitude des vibrations en fonction du type de sol.

Afin d'appliquer la formule de l'amortissement des vibrations selon la DIN 4150, il est nécessaire de déterminer les paramètres intermédiaires.

8.1. Le rayon de criticité

L'équation (8) et les paramètres permettant de calculer le rayon de criticité sont donnés au point 6.2.

$$R_1 = \frac{a}{2} + \lambda_R \quad (8)$$

Lorsque la source est ponctuelle, l'hypothèse que la distance (a) soit proche de zéro peut être posée. Dans ce cas, le rayon de criticité (R_1) vaudrait simplement la longueur d'onde de Rayleigh (λ_R).

L'organigramme de la figure 8.1 résume les différentes étapes utilisées pour calculer le rayon de criticité. La longueur d'onde de Rayleigh peut être calculée en utilisant la vitesse de propagation des ondes, qui dépend elle-même de la propagation des ondes de cisaillement, elle-même influencée par le module de Young, le coefficient de Poisson et la densité.

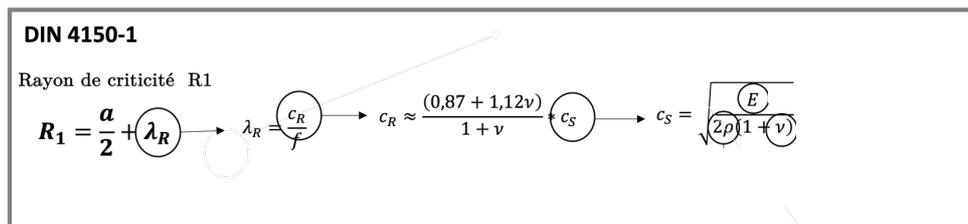


Figure 8.1: Organigramme

Une formule simplifiée pour le calcul de la vitesse des ondes de Rayleigh a été proposée par l'ORB (Observatoire royal de Belgique) sur base de mesures expérimentales, qui dépend uniquement de la vitesse de cisaillement (c_S), qui peut être déterminée dans la littérature.

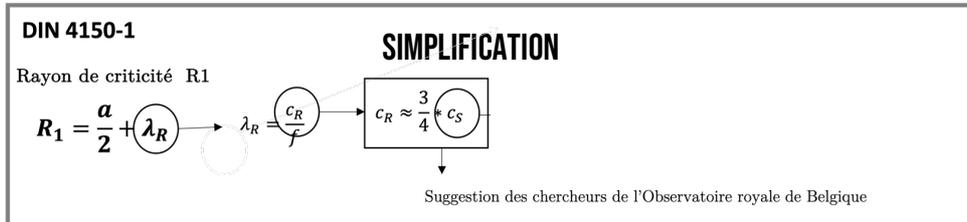


Figure 8.2: Organigramme simplifié.

La figure 8.3 ci-dessous a été réalisée en synthétisant des tableaux expérimentaux de la littérature. Il ne s'agit pas de valeurs très précises, mais le tableau fournit un ordre de grandeur correct qui permet de calculer la vitesse de propagation des ondes de Rayleigh en fonction du type de sol. Comme mentionné au point 2, seul la vitesse de propagation des ondes secondaires (Vitesse S) sera utilisée.

Type de sols	Vitesse P [m/s]	Vitesse S [m/s]	Densité
Calcaire	6000	3300	2,7
Schiste	4830	2682	2,9
Béton	4180	2472	2,4
Marne	3000	1500	2,6
Craie	2600	1300	2,3
Grès	3000	1200	2,55
Sable humide	2750	800	2
Sable sec	800	300	1,6
Argile	1100	200	2,2
Limon	530	168	1,45
Remblai	300	100	1,7

Figure 8.3: Tableau des vitesses P, S et de la densité en fonction du type de sol.

8.2. L'amortissement des vibrations

Le rayon de criticité permet de calculer l'amortissement des vibrations qui se produit après ce rayon, selon la formule de la DIN 4150. L'équation et les paramètres nécessaires pour calculer cet amortissement et l'amplitude de la vitesse de vibration sont présentés dans la section 6.2. précédente.

$$\bar{v} = \bar{v}_1 \left(\frac{R}{R_1} \right)^{-n} \exp(-\alpha(R - R_1)) \quad (9)$$

Le rayon de criticité (R_1) a été déterminé précédemment et la distance R est la distance à laquelle il faut connaître la vitesse de propagation.

L'exposant (n) peut être déterminé grâce au graphique de la figure 6.1. Le coefficient d'atténuation (α) vaut $\alpha \cong 2\pi D/\lambda$ avec D étant le facteur d'amortissement et vaut généralement 0,01 selon la norme.

La longueur d'onde pertinente (λ) n'est pas définie par la norme. Une supposition peut être faite : $\lambda = \frac{c_s}{f}$ dont tous les termes ont été présentés précédemment.

Le terme (\bar{v}_1) est l'amplitude de la vitesse de vibration à une distance R_1 qui doit être déterminée expérimentalement dans un premier temps.

9. Traitement des données.

Dans le cadre de ce travail, des campagnes de mesure ont été réalisées sur deux chantiers différents avec un géophone et un accéléromètre. Le but étant de prendre des mesures de vitesses des vibrations à deux ou plusieurs endroits simultanément. Ainsi, les valeurs d'amplitudes des vibrations peuvent être comparées, après un traitement de données, pour en déduire l'amortissement des vibrations.

Sur le premier chantier, les mesures ont été réalisées à l'aide des accéléromètres pour mesurer les vibrations du forage des pieux, du vibrofonçage des cages d'armatures de pieux et du déplacement des pelles hydrauliques. Les mesures étant fortement polluées par l'utilisation d'un accéléromètre (dû à la constante d'intégration), il y a l'apparition de valeurs parasites en basses fréquences qui sont peu discernables de valeurs issues des sources ciblées. De ce fait, l'utilisation d'une FFT (Fast Fourier Transform) est nécessaire. Un aperçu des données obtenues est représenté sur la figure 9.1.

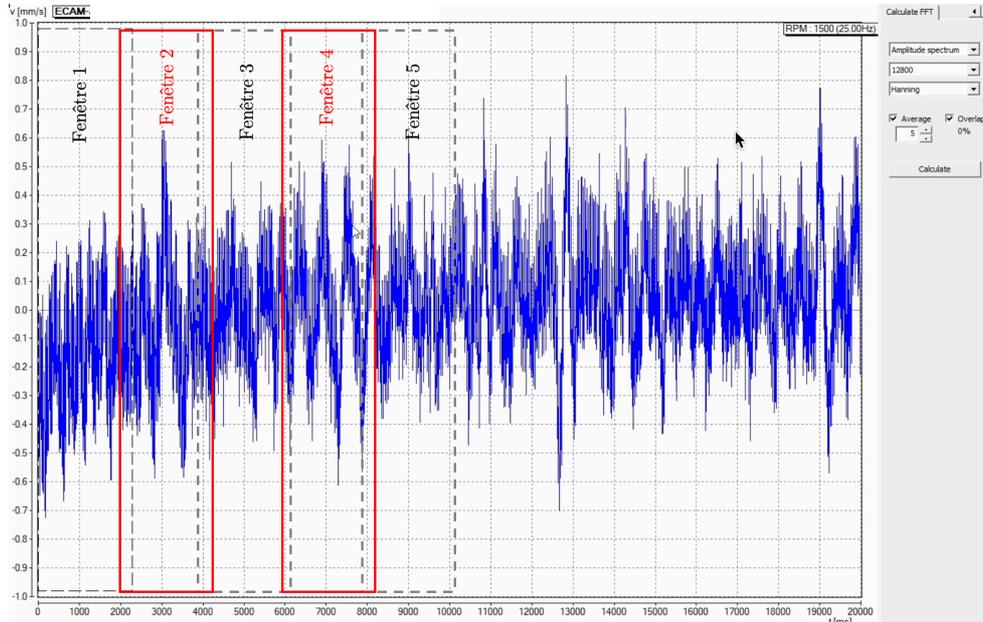


Figure 9.1 : Résultats de la campagne de mesure.

Les paramètres choisis sont indiqués sur la droite et correspondent à un échantillonnage de 12800 points, avec une fenêtre de Hanning (pour réduire les effets de bords), une moyenne de 5 fenêtres de 12800 points et un « overlap » pour une superposition des fenêtres (pour plus de précision).

Après avoir appliqué la FFT avec les paramètres précédents, le logiciel permet de ressortir les 10 pics d'amplitude et leurs fréquences associées. Ainsi, il est possible de tester l'outil créé afin de valider ou non son utilisation.

Les mesures sur le deuxième chantier ont été effectuées grâce aux géophones sismiques afin de connaître les vibrations engendrées par une pelle excavatrice, un marteau hydraulique et un camion benne. Le positionnement des géophones sismiques doit être indiqué précisément afin d'en connaître les distances exactes. Ce type d'appareil fournit des données brutes, il est donc nécessaire de les synchroniser et de noter l'heure précise à laquelle un événement se produit afin de pouvoir y associer une mesure lors du post-traitement. Les résultats bruts obtenus sont représentés sur la figure 9.2.

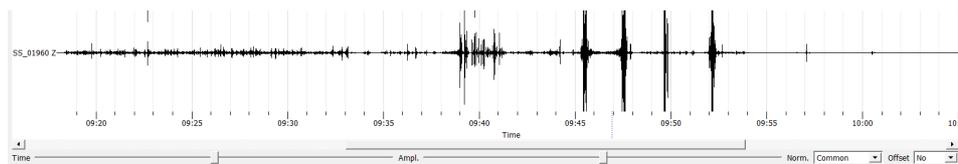


Figure 9.2: Résultats obtenus grâce aux géophones sismiques.

Les résultats étant assez précis, cela permet de comparer directement les analyses temporelles globales, comme l'exemple donné sur la figure 9.3.

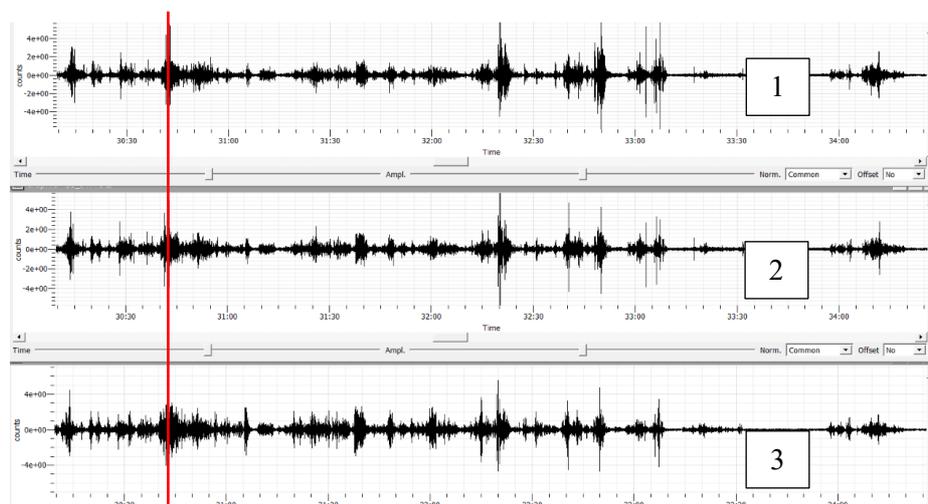


Figure 9.3: Mesures prises avec les géophones à 3 distances différentes.

En plus de tous les résultats, il est primordial de connaître le type de sol aux différentes profondeurs étudiées puisque celui-ci a un impact direct et important sur la propagation et donc, sur la prédiction des vibrations.

D'autres données de la littérature ont pu être introduites dans l'outil développé, dont la plupart proviennent de normes (BS 5228) ou des données expérimentales.

10. Utilisation de l'outil

Sur base des résultats obtenus à différentes distances, il est possible de trouver les amplitudes des vibrations selon la BS 5228 et la DIN 4150-1.

Concernant la feuille de calcul de la BS 5228, l'outil applique les formules et compare les résultats aux seuils donnés par la norme [5].

La feuille de calcul concernant la DIN 4150 est plus complexe. En effet, pour calculer l'amortissement des vibrations, la norme impose de connaître les vibrations au rayon de criticité, or, cela nécessite dans un premier temps des mesures sur chantier. Ainsi, deux cas de figure subsistent et sont représentés sur la figure 10.1.

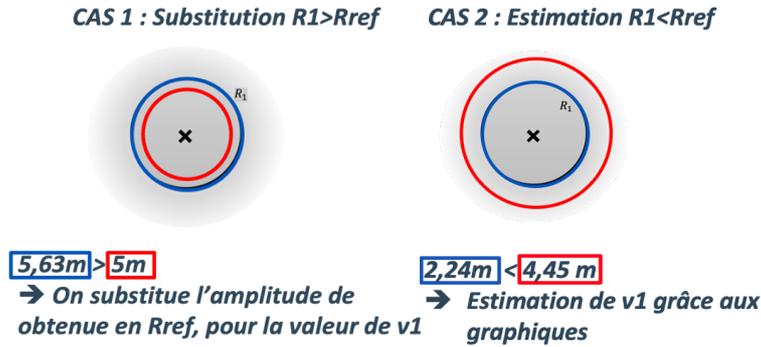


Figure 10.1: Deux cas pour l'utilisation de la DIN 4150.

Cas 1 : Lorsque la distance à laquelle a été prise la mesure (rouge) est inférieure au rayon de criticité (bleu), il suffit de substituer l'amplitude obtenue à cette distance, comme valeur de \bar{v}_1 .

Cas 2 : lorsque la distance (rouge) est supérieure au rayon de criticité (bleu), la valeur de \bar{v}_1 peut être estimée grâce aux différents graphiques de l'évolution des vibrations normalisée en fonction de la vitesse $R - R_1$. Ces graphiques sont créés par l'outil grâce aux indications de la DIN 4150-1 et sont adaptables dans l'outil en fonction du type de sol. Un exemple est repris ci-dessous :

La figure 10.2 est un tableau récapitulatif reprenant les données expérimentales dans les 4 premières colonnes. La colonne « DIN 4150-1 » est le résultat de l'utilisation de l'outil.

Vibrofonçage					
Nom	Distance de la source [m]	Fréquence [Hz]	Amplitude [mm/s]	DIN 4150-1	Activités
aa A	4,45		0,03	0,03	
aa B	7,5	33,5	0,02	0,02	Vibrofonçage de la cage d'armature
ee A	4,5	33,5	0,05	0,05	
ee B	6,5		0,03	0,04	

Figure 10.2: résultat après traitement des données.

Rayon de criticité		
Type de sol	Remblai	
cs	100	[m/s]
cr	75	[m/s]
ρ	1,7	
f	33,5	Hz
a	0	[m]
λR	2,24	m
R1	2,24	m

Vitesse des ondes de cisaillement
 Vitesse des ondes de Rayleigh
 Masse volumique
 Fréquence d'excitation de la source
 Dimension de la source // à la propagation
 Longueur d'onde de Rayleigh
 Rayon de criticité

Figure 10.3: Exemple de calcul fait par l'outil.

Le rayon de criticité calculé à l'aide du type de sol et de la fréquence (voir figure 10.3) est inférieur à la distance à laquelle la mesure de référence a été faite (Cas 2 : $2,24m < 4,45m$). Dans ce cas, la norme ne permet pas d'appliquer la formule de l'amortissement. Pour pallier à ce problème, une solution serait d'utiliser les graphiques de l'évolution de la vitesse des vibrations normalisées en fonction de la distance $R - R_1$ comme représenté sur la figure 10.4.

Le graphique créé par l'outil permet d'approximer le rapport v/v_1 grâce à la distance $R - R_1$ ($4,45 + 2,239 = 2,211m$) et d'en déduire l'amplitude des vibrations v_1 en connaissant v l'amplitude mesurée à $4,45m$.

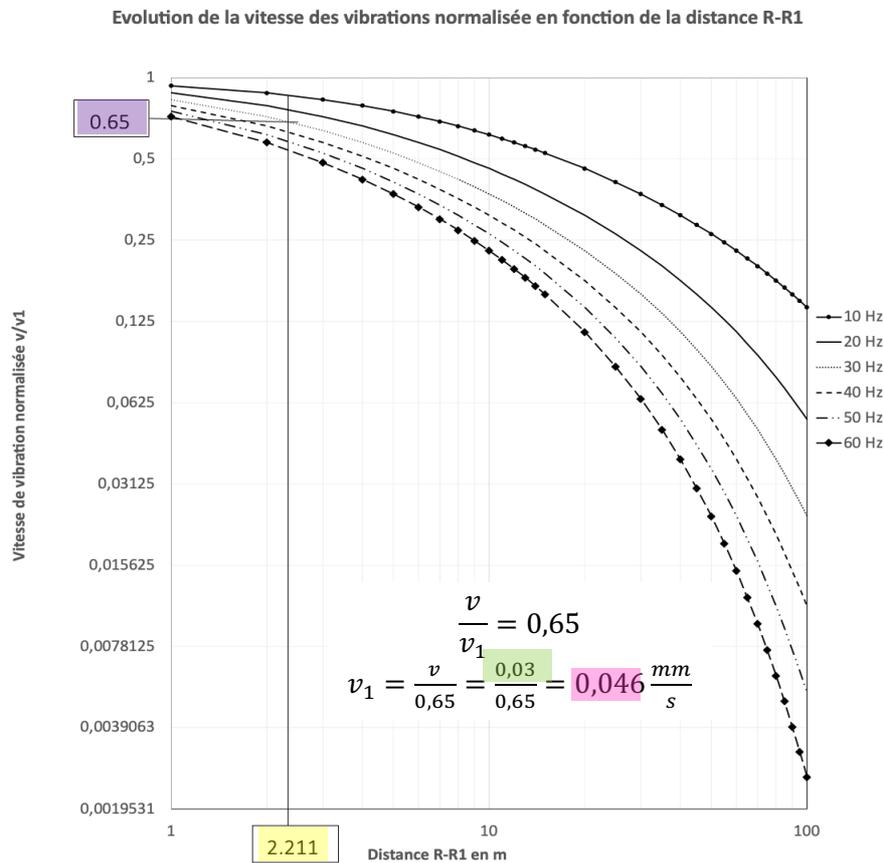


Figure 10.4: l'évolution de la vitesse des vibrations normalisée en fonction de la distance $R-R_1$.

Une fois que la valeur de v_1 a été trouvée, elle peut être introduite dans le reste de la feuille de calcul (voir figure 10.5).

Amortissement de l'amplitude après R1			
R	7,5	[m]	$R > R_1$ Distance de la source
v1	0,046	[mm/s]	Amplitude de la vitesse de vibration à une distance R1
n	0,5	[-]	Exposant
D	0,01	[-]	Facteur d'amortissement
λ	2,99	[m]	Longueur d'onde pertinente [m]
R/R1	3,35	[-]	
α	0,02	[m ⁻¹]	
v	0,02	[mm/s]	Amplitude de la vitesse de vibration

Figure 10.5: Calcul de l'amortissement des vibrations par l'outil.

Ces trois méthodes ont été appliquées aux données traitées et une comparaison graphique avec les seuils de la DIN 4150-3 est également faite dans l'outil (voir figure 10.6) afin de s'assurer que les vibrations n'ont pas d'impact sur les structures.

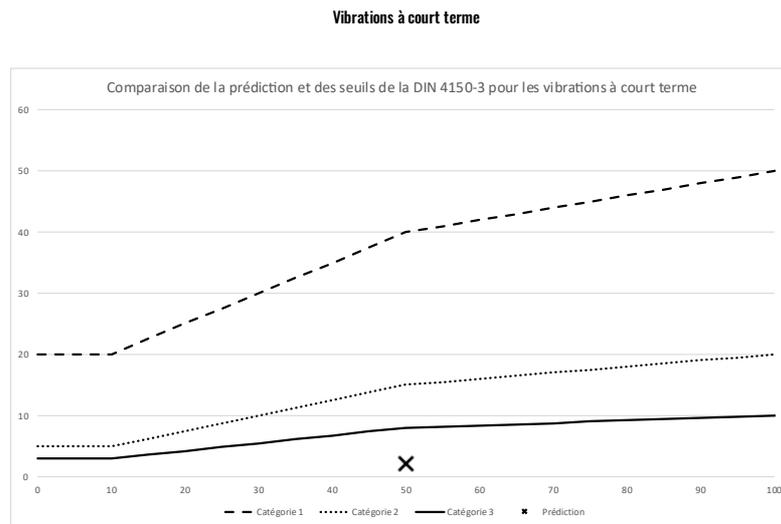


Figure 10.6: Comparaison de la valeur calculée et les seuils des normes.

11. Comparaison et résultats

(Pour cause de confidentialité, les résultats ne sont pas détaillés.)

Concernant la norme britannique BS 5228, la validité des formules concernant le compactage vibrant n'a pas pu être vérifiée par manque de données. Les autres formules ont pu être testées et après analyse, cette norme semble fournir des estimations correctes dans le cas du battage des pieux et du compactage dynamique avec une différence sécuritaire jusqu'à 10% pour le battage des pieux. Par ailleurs, le nombre

de données étant très limité, ces résultats ne sont pas suffisants pour valider la feuille de calcul selon la BS 5228.

La feuille de calcul concernant la DIN 4150-1 a fourni des prédictions assez cohérentes et précises lorsqu'elle est utilisable. En effet, connaître tous les paramètres est assez contraignant, puisque pour trouver la valeur de v_1 , il est indispensable de faire une mesure sur terrain à une distance R_1 qui correspond au rayon de criticité. De ce fait, son utilisation nécessite forcément une prise de mesure ou une méthode théorique qui permettrait de prédire les vibrations au rayon de criticité. De plus, un problème se pose lorsque la distance de la mesure est inférieure au rayon de criticité, auquel cas des hypothèses doivent être posées et la méthode de l'estimation (expliquée au point 10) peut être appliquée si elle est validée.

Le tableau suivant montre les différences relatives entre les valeurs expérimentales et la DIN 4150-1 concernant différentes activités de chantier (voir figure 11.1). Une différence positive et sécuritaire de 14% à 34% en moyenne est observable.

Activités	Différences relatives moyennes pour la DIN 4150-1
Vibrofonçage	16,7%
Utilisation de pelles hydrauliques	33,8%
Déplacement des machines	26,2%
Forage des pieux sécants	25,2%
Battage des pieux par percussion	14,1%

Figure 11.1: Tableau des résultats de la comparaison.

12. Conclusion

Cette étude a pour objectif de caractériser l'impact des vibrations des engins de chantier sur les bâtiments environnants. Les activités de chantiers peuvent donner lieu à de l'inconfort et dans de rares cas, des dommages structurels.

L'amplitude des vibrations prédite grâce à la feuille de calcul de la DIN 4150 se situe entre 14% et 33% supérieur aux valeurs expérimentales. C'est une approximation sécuritaire et qui donne des perspectives plutôt encourageantes.

Une amélioration peut être apportée lors de la prise de mesure, notamment dans le choix et la mise en place de l'appareil de mesure, l'influence des autres sources de vibration sur les mesures (utilisation simultanée des machines), la prise de mesures et de distances. De plus, il faut être conscient des hypothèses posées telles que la nature du sol, les fréquences d'excitation, la méthode de l'approximation du rayon

de criticité. Par ailleurs, la meilleure démarche d'amélioration réside principalement dans l'augmentation des données exploitables. En effet, une base de données plus importante permettrait de valider et d'améliorer l'outil de calcul afin qu'il soit utilisable dans la prédiction des vibrations.

À terme, l'idéal serait d'avoir plus de données comparables aux normes afin de valider et améliorer l'outil de calcul. Ainsi, il serait vraisemblablement possible de prédire de manière plus précise l'impact vibratoire des activités de chantier avant de commencer l'exécution du projet. Cela permettra de prédire les éventuels risques de dommages structurels aux bâtiments environnants et, de façon complémentaire, les risques d'inconfort sur les riverains.

13. Sources

- [1] Chahour, K. (2015). *Etude dynamique des vibrations d'un sol engendrées par une charge en mouvement* [Thesis, Université Mouloud Mammeri]. <https://www.ummo.dz/dspace/bitstream/handle/ummo/1839/CHAHOUR%20Kahina.pdf?sequence=1>
- [2] German Standards (DIN-Normen). (2001). *DIN 4150-1:2001-06 : Structural vibration Part 1 : Predicting vibration parameters*. German Standards (DIN-Normen).
- [3] German Standards (DIN-Normen). (1999). *DIN 4150-3 : 1999-02 : Structural vibration Part 3 : Effects of vibration on structures*. German Standards (DIN-Normen).
- [4] The British Standards Institution, E. (2014). *BS 5228-2:2009+A1:2014 Code of practice for noise and vibration control on construction and open sites Vibration*. <https://www.en-standard.eu/bs-5228-2-2009-a1-2014-code-of-practice-for-noise-and-vibration-control-on-construction-and-open-sites-vibration/>
- [5] Chang, W. (2023). *Approche d'une méthode prédictive de la transmission des vibrations dues aux activités de chantiers dans le cadre de la protection des bâtiments et riverains du proche environnement*, Mémoire de master, ECAM, Bruxelles.