



HAL
open science

Étude pour une meilleure gestion des nuisances sonores et vibratoires dues à l'activité de chantier de construction de bâtiments

Igor Prade

► **To cite this version:**

Igor Prade. Étude pour une meilleure gestion des nuisances sonores et vibratoires dues à l'activité de chantier de construction de bâtiments. Acoustique [physics.class-ph]. 2013. dumas-01147491

HAL Id: dumas-01147491

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01147491>

Submitted on 30 Apr 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS

PARIS

MEMOIRE

Présenté en vue d'obtenir

Le DIPLOME d'INGENIEUR CNAM

Spécialité : ACOUSTIQUE

par

Igor PRADE

**Etude pour une meilleure gestion des nuisances sonores et vibratoires dues
à l'activité de chantier de construction de bâtiments**

Soutenu le 23 septembre 2013

JURY

PRESIDENT : Alexandre GARCIA

MEMBRES : Manuel MELON

Eric BAVU

Noël BASTIDE

Marc ASSELINEAU

REMERCIEMENTS :

Mon stage s'est déroulé au bureau d'étude « Peutz et Associés ». Cette structure, spécialisée en conseil en ingénierie acoustique, opère sur un spectre très large allant de l'acoustique du bâtiment à l'électroacoustique en passant par l'acoustique appliquée aux salles de spectacle ainsi qu'aux domaines touchant à l'environnement et à l'industrie.

Je tiens à remercier, en premier lieu, M. Stéphane MERCIER, directeur de l'étude, qui m'a accueilli au sein de son équipe et m'a fait bénéficier de ses conseils avisés lors de nos réunions régulières pour le suivi et l'état d'avancement de mes recherches.

Un remerciement particulier s'adresse à M. Marc ASSELINEAU, mon responsable de stage, le doyen des lieux, qui m'a suivi tout au long de cette expérience. Il a su me faire partager de sa longue pratique de l'acoustique en répondant à toutes mes questions et en agrémentant ses réponses d'exemples et d'histoires souvent truculentes qui, en plus d'être souvent amusantes, exposaient des problèmes d'acoustiques intéressants qui ne peuvent se rencontrer que sur le terrain.

Je ne peux oublier non plus toute l'équipe des ingénieurs et techniciens de ce bureau qui m'ont fait confiance en me faisant participer à leurs projets d'étude que ce soit au moment de leur conception que sur le terrain lors de visites de chantier. Je profite donc de l'occasion pour les en remercier chaleureusement.

Cependant, ce mémoire est également le fruit de rencontres réalisées à l'extérieur de ce bureau d'étude. Il me faut citer tout d'abord M. Maurice AUFFRET, acousticien et également ingénieur conseil au Centre d'Information et de Documentation sur le Bruit, qui m'a fait profiter de ces nombreux contacts au sein du milieu du bâtiment et notamment m'a fait connaître son confrère et ami Marc ASSELINEAU, que je n'ai plus besoin de présenter. Je te remercie donc pour ta générosité et également pour tes conseils qui m'ont permis d'avancer plus sûrement.

Cet espace ne serait pas complet si je ne citais Mme Bénédicte HAYNE-LECOCQ et M. Jean-Louis TEBEC, professeurs au Laboratoire de Mécanique Vibratoire et d'Acoustique à l'Ecole nationale Supérieure des Art et Métier de Paris. Ils m'ont reçu avec beaucoup de générosité en m'ont fait profiter de leur expérience dans leur domaine de recherche notamment en m'exposant le résultat d'un de leur projet relatif à l'édification d'un mur anti-

bruit à base de pneus recyclés, invention judicieuse qui sera reprise dans ce mémoire lorsqu'il sera abordé le thème des procédés d'isolation au bruit. Un grand merci donc à ces deux chercheurs passionnés dont l'enthousiasme communicatif m'a accompagné tout au long de cette aventure.

Je me dois également de remercier particulièrement M. Xavier CARNIEL, Responsable des Actions Collectives au Pôle « Ingénierie Bruit et Vibrations » du Centre Technique des Industries Mécaniques (Cetim) de Senlis qui s'est rendu disponible pour me recevoir. La visite des laboratoires de mesures a été un moment enrichissant. Je me souviens plus particulièrement de nos discussions sur un projet de recherche qu'il a mené sur les bruits de chantier qui a donné suite à une étude sur les points sources des bruits lors d'activité de différents engins habituellement utilisés sur un site de construction. Il m'a également transmis les résultats d'une méthode prévisionnelle d'évaluation des niveaux sonores de chantiers réalisée en partenariat avec le Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA).

Je ne peux oublier non plus ma rencontre avec Mme Isabelle SCHMICH et M. Julien MAILLARD du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment de Saint Martin d'Hères (Département de l'Isère) qui m'ont entretenu sur les logiciels de cartographie de bruit utilisés notamment dans le bâtiment et plus particulièrement le logiciel « Byoasis » dont la particularité sera succinctement développée en annexe 4 de ce document. Je les remercie également pour le temps qu'ils m'ont consacré et les discussions enrichissantes qui ont suivi.

Enfin, je terminerai ce tour de table des remerciements par ceux que j'adresse également à M. CAPARROS, conducteur de travaux pour la société « Bateg », qui m'a parlé de son métier et notamment des difficultés que l'on peut rencontrer sur un chantier pour ce qui concerne la gestion des nuisances sonores.

TABLE DES MATIERES :

INTRODUCTION	p1
PREMIERE PARTIE : Quelques rappels de physique acoustique et vibratoire	p3
1-1 Propagation acoustique	p3
1-1-1 Propagation sphérique	p3
1-1-2 Propagation cylindrique	p4
1-1-3 Pondération acoustique	p4
1-1-4 Niveau équivalent	p6
1-2 Physique vibratoire	p7
1-2-1 Paramètres vibratoires	p7
1-2-2 Niveaux vibratoires	p7
DEUXIEME PARTIE : Réglementation, normalisation dans les domaines du bruit et des vibrations	p9
2-1-Protection du personnel sur le chantier.	P9
2-1-1 Textes sur le bruit :	p9
2-1-2 Textes sur les vibrations	p11
2-2 Protection du voisinage.	p12
2-2-1 Textes traitant du bruit	p12
2-2-2 Textes traitant des vibrations.	p13
2-2-2-1 La gêne vibratoire.	p13
2-2-2-2 La protection des bâtiments.	P15
Analyse critique des différentes normes	p19
2-3 Réglementation sur les matériels de chantier	p20
2-3-1 Réglementation sur le bruit	p20
2-3-2 Réglementation sur les vibrations	p21

2-4 Jurisprudence	p23
2-4-1 La nature de l'infraction	p23
2-4-2 Détermination des responsabilités	p24
2-4-3 Synthèse des jurisprudences	p25
2-4-3-1 Éléments à charge retenus	p25
2-4-3-2 Éléments à décharge retenus	p26
Conclusions	p27
TROISIEME PARTIE : Analyse d'un chantier	p28
Principales étapes d'un chantier	p28
Le gros œuvre	p28
3-1 La démolition	p28
3-1-1- -Démolition à l'explosif	p29
3-1-2- Démolition mécanique	p32
3-2 Le terrassement et les fondations	p34
3-2-1 Le terrassement	p34
3-2-2 Les fondations	p36
3-2-2-1 Les fondations superficielles	p36
3-2-2-2 Les fondations profondes	p37
3-3 Elévation du bâtiment	p42
QUATRIEME PARTIE : Prise en compte des nuisances sonores et vibratoires dans un projet de chantier	p45
Principes d'isolation pour réduire les niveaux sonores et vibratoires d'un chantier	p45
4-1 Isolation acoustique	p45
4-1-1 Action sur la source sonore	p45
4-1-2 Action sur la propagation acoustique	p49
4-1-3 Action sur le lieu de réception	p51
4-2 Isolation vibratoire	p52
4-2-1 Action sur la source vibratoire	p52
4-2-2 Action sur la propagation vibratoire	p52
4-2-3 Action sur le lieu de réception	p54

CINQUIEME PARTIE : Analyse d'un chantier : Le « Nouveau Carreau du Temple » p55

5-1 Définition et enjeux du projet	p55
5-1-1 Un peu d'histoire	p55
5-1-2 Nature du projet	p56
5-1-3 Les enjeux	p57
5-2 Etude acoustique et mise en place d'une surveillance acoustique et vibratoire :	p58
5-2-1 Définition d'une station de surveillance	p58
5-2-2 Détermination des emplacements des balises	p59
5-2-3 Compléments au dispositif de surveillance	p63
5-3 Analyse de 6 mois de surveillance	p64
Conclusions	p71

SIXIEME PARTIE : Procédure pour une meilleure gestion des nuisances sonores et vibratoires sur un chantier p72

6-1 Organisation en amont du chantier	p72
6-1-1 Etude environnementale et communication	p72
6-1-2 Etude acoustique et vibratoire	p74
Référé préventif	p74
6-1-3 Choix du matériel de chantier	p75
6-1-4 Planification des niveaux sonores des engins de chantier	p76
6-1-5 Organisation des transports de matériaux	p77
6-1-6 Planification et organisation des horaires de chantier	p78
6-1-7 Formation, information et sensibilisation des compagnons	p79
6-1-8 Chartre du chantier	p79
6-2 Surveillance pendant la durée du chantier	P80
6-2-1 Mise en place d'une surveillance acoustique et vibratoire	p80
6-2-2 Contrôle de l'efficacité des stations	p81
6-2-3 Entretien d'une bonne communication	p81
6-3 Clôture du chantier	p82
Conclusions	p83

CONCLUSIONS GENERALES	p85
ANNEXES	p87
A1 Vibrations induites dans les sols	p87
A 1-1 Les ondes de volume	p87
A 1-2 Les ondes de surface	p88
A2 Rappel de physique des forces (ou contraintes)	p 90
A3 Méthodes prévisionnelles d'évaluation des nuisances sonores dans un projet de chantier	p 91
A 3-1 Prévision des niveaux de puissance acoustique in situ des engins de chantier	p91
A3 1-1 Relation entre la puissance d'homologation et la puissance in situ	p91
A3 1-2 Définition des termes correctifs	p91
A3-1-3 Analyse critique des résultats	p94
A3-2 Méthode normalisée de calcul des de bruits des engins de chantier par rapport au voisinage proche	p94
A3 2-1 Méthode d'évaluation pour les activités de chantier de type statique	p95
A3-2-2 Méthode d'évaluation pour les activités de chantier de type mobile	p99
A3-3 Mise en pratique de la méthode normalisée	p102
A4 Prévision des niveaux vibratoires	p108
A4-1 Paramètres physiques du sol	p109
A4-2 Différentes méthodes d'évaluation des niveaux vibratoires	p112
A4-2-1 Méthode énergétique	p112
A4-2-2 Méthode des vitesses relatives	p117
A4-3 Couplage sol-bâtiment	p125
A4-4 Méthode prévisionnelle par modélisation numérique	p126
BIBLIOGRAPHIE	p129

Liste des figures :

Figure 1 : Propagation acoustique d'une source sonore sur une demi-sphère	p4
Figure 2 : Propagation acoustique d'une source linéique sur un demi-cylindre	p4
Figure 3 : Comparaison des différentes normes relatives aux modules de vitesse particulaire limite pour des vibrations continues (ROCHER-LACOSTE, 2008).	P18
Figure 4 : Comparaison des différentes normes relatives aux modules de vitesse particulaire limite pour des vibrations intermittentes (ROCHER-LACOSTE, 2008)	p18
Figure 5 : Etiquetage « C.E ».	p20
Figure 6 : Etiquetage de la puissance acoustique sur les engins de chantier.	P20
Figure 7 : Exemple d'un procédé de mesure de puissance acoustique d'un moteur (les chiffres représentent l'emplacement des microphones de mesure.).	p21
Figure 8 : Différents type de semelles pour des fondations superficielles.	P36
Figure 9 : Battage d'un pieu (ROCHER-LACOSTE, 2008)	p38
Figure 10 : Principe mécanique du vibreur (AKLE, 2006).	P38
Figure 11 : Mécanisme de génération d'onde de surface R , de cisaillement S et de compression P par battage ou vibrofonçage de pieux dans un sol homogène (AL ABDEH, 2005).	p40
Figure 12 : Foreuse en activité.	p40
Figure 13 : Technique de coulage d'un pieu en béton par forage dans un sol non cohérent.	p41
Figure 14 : Principe de fonctionnement du vérin hydraulique pour l'enfoncement de palplanches.	p42
Figure 15 : Paire de banches entre lesquelles va être coulé le béton.	p42
Figure 16 : Mise en place d'une <u>jupe acoustique</u> sur le mât de battage	p46
Figure 17 : Différents types d'isolation acoustique de marteau de brise roche.	P47
Figure 18 : Mise en place d'un coffrage autour d'un groupe compresseur.	P47
Figure 19 : Mise en place de barrières acoustiques autour d'un engin de chantier (BS 5228-1 Part 1 (2009)).	P48
Figure 20 : Principe de montage des pneus et mis en place du mur.	P50
Figure 21 : Courbe de réponse atténuation / fréquences du mur de pneus de la figure 21.	P50
Figure 22 : Mise en place d'une tranchée comme barrière contre la transmission vibratoire dans le sol.	P52

Figure 23 : Technique d'isolation par tranchée remplie par un rideau de couches de gaz (AL ABDEH, 2005).	P53
Figure 24 : Dalle flottante sur plots à ressort.	P54
Figure 25 : Plan du site en vue aérienne du « Nouveau Carreau du Temple » et de ses alentours.	P57
Figure 26 : Protocole mis en place pour la gestion des dépassements de seuils rouges des stations de surveillance.	P59
Figure 27 : Emplacement de l'accéléromètre et du microphone de la station de mesure située dans la cour d'immeuble RIVP.	P61
Figure 28 : Calcul du seuil acoustique d'une station de surveillance par rapport à un immeuble voisin (Coupe transversale)	p62
Figure 29 : Mise en place des 3 stations de surveillances sur le site.	P63
Figure 30 : Bonnes pratiques sur un chantier pour une meilleure gestion des nuisances sonores.	P83
Figure 31 : Ondes de volume P (ATHANASOPOULOS et PELEKIS, 2000)	p87
Figure 32 : Onde de volume S (ATHANASOPOULOS et PELEKIS, 2000)	p88
Figure 33 : Ondes de Love de surface (ATHANASOPOULOS et PELEKIS, 2000).	P88
Figure 34 : Onde de Rayleigh de surface (ATHANASOPOULOS et PELEKIS, 2000)	p89
Figure 35 : Différents types de tassement de terrain (DE NEHOUS).	P90
Figure 36 : Plan d'une barrière sur lequel figurent les distances a, b, et c pour le calcul du nombre de Fresnel N (BS 5228-1, 2009).	P97
Figure 37 : Plan d'implantation des engins de chantier pour estimation des niveaux sonores au point de mesure E.	p102
Figure 38 : Classement des sols suivant leur granularité.	P109
Figure 39 : Graphe représentant l'amplitude par rapport au temps des ondes mesurées en un point situé en surface d'un sol homogène, relativement proche de la source (JONES et STONE, 2004). Vitesse de propagation = célérité des ondes : ondes R < ondes S < ondes P.	p110
Figure 40 : Chemin de propagation des vibrations de l'engin de chantier à l'immeuble voisin avec transformation de vibrations solidiennes en ondes acoustiques par rayonnement des structures (VOGIATZIS, 2008)	p125
Figure 41 : Exemple de cartographie du bruit où chaque surface colorée correspond à un même niveau sonore.	P128

Liste des tableaux:

Tableau I : Courbe isosonique de l'oreille humaine selon Flechter et Munson	p5
Tableau II : Graphes des courbes de pondération A, B et C.	p5
Tableau III : Pondération fréquentielle A par bandes d'octave	p6
Tableau IV : Seuils d'exposition au bruit du travailleur.	p10
Tableau V : Tableau récapitulatif des seuils maxima à respecter par la législation du travail.	p11
Tableau VI : Vitesse de vibration et degré de perception	p13
Tableau VII : Courbe VC (Vibration Criterion) suivant la nature du site ou du matériel à protéger (BS 5228-2 (2009)).	P14
Tableau VIII : Valeurs limites de vibration à respecter pour le confort humain selon l'Eurocode 3 (WHITE <i>et al</i> (2002))	p15
Tableau IX : Vitesses limites (en $mm. s^{-1}$) pour la protection des bâtiments selon la circulaire du 23 juillet 1986.	P16
Tableau X : Comparatif des critères d'évaluation des seuils de vibrations de différentes normes (AKLE (2006))	p17
Tableau XI : Synthèse générale sur la réglementation et les normes applicables sur un chantier.	P22
Tableau XII : Niveau de puissance acoustique maximale d'un marteau-piqueur ou brise roche suivant son poids.	p33
Tableau XIII : Performance d'isolation d'un coffrage dans différentes configurations (BS 5228-1 Part 1 (2009)).	p48
Tableau XIV : Exemple de rédaction des conclusions des résultats d'analyse des listings des stations de surveillance acoustique.	p65
Tableau XV : Exemple d'évolution temporelle des niveaux sonores et vibratoire de la balise de surveillance située dans la cour d'immeuble RIVP avec annotations suite à analyse des échantillons sonores correspondant aux dépassements des seuils.	p66

Tableau XVI : Exemple de synthèse des résultats sur une période de d'un an pour la station de surveillance située dans la cour d'immeuble RIVP	p67
Tableau XVII : Exemple d'analyse statistique des 3 mois les plus bruyants visés dans le tableau XVI en provenance des enregistrements de la station de surveillance située dans la cour d'immeuble RIVP.	P68
Tableau XVIII : Diagramme de Gantt des niveaux de puissances sonores des engins lors des différentes phases du chantier associés à l'évaluation primaire (sans termes correctifs) du niveau sonore global en un point x .	p78
Tableau XIX : Tableau récapitulatif des termes correctifs applicables pour le calcul de la puissance acoustique L_{WA} in situ de certains engins de chantier.	P93
Tableau XX : Abaque précisant l'indice d'ajustement K'_H et K'_S à soustraire du niveau L_{WA} pour le calcul du LA_{eq} . (BS 5228-1, 2009).	P96
Tableau XXI : Niveaux d'atténuation acoustique de la barrière à différentes fréquences par rapport au nombre de Fresnel N (BS 5228-1, 2009).	P98
Tableau XXII : Abaque précisant l'indice d'ajustement $K_T(P)$ à soustraire au niveau L_{WA} pour le calcul du LA_{eq} . (BS 5228-1, 2009).	P99
Tableau XXIII : Relation entre le ratio de distance D' et son facteur de correction temporel F (BS 5228-1, 2009).	P100
Tableau XXIV : Engins de chantiers associés au type de vibrations produites (RICHART, 1970).	P108
Tableau XXV : Fréquences de résonance pour différents sols testés lors de vibrofonçage de pieux.	P112
Tableau XXVI : Distances minimales r , en mètre, à respecter pour le fonçage de pieux afin d'éviter tout dommages dans les bâtiments avoisinant, selon l'Eurocode 3. (avec $r = K \left[\frac{\sqrt{W_0}}{v} \right]$).	P115
Tableau XXVII : Valeurs du coefficient d'amortissement géométrique n suivant le type de sol (hypothèse $\alpha = 0$).	P119
Tableau XXVIII : Valeurs du coefficient d'amortissement matériel α suivant la nature du sol (Hypothèse $n=0,5$).	P120

Introduction :

Parmi les nuisances rencontrées dans un tissu urbain, le problème du bruit se trouve parmi les premières préoccupations des citoyens. Les conséquences sur la santé ne sont plus à prouver au regard des résultats obtenus par de nombreuses études dans ce domaine, notamment celles réalisées dans le milieu du travail.

Se protéger du bruit ou des vibrations est devenu un enjeu sanitaire et environnemental au même titre que de se prémunir d'une pollution de l'air ou de l'eau. Ce constat s'exprime par une certaine pression sociale que les élus ont su percevoir et reconnaître. Cette prise de conscience se traduit notamment par la mise en place, dans certaines grandes métropoles, d'une politique axée sur une meilleure gestion des nuisances sonores afin d'en favoriser leur réduction.

Les activités de chantier sont un vecteur de bruit et de vibrations et entrent dans cette problématique. Cependant, elles recouvrent un caractère particulier du fait qu'elles sont utiles et nécessaires pour l'urbanisation d'une ville et qu'il n'est donc pas envisageable de s'en priver.

Cependant, concilier travaux en zone urbaine et protection du voisinage est un challenge que les maîtres d'ouvrages, initiateurs des travaux, se doivent de prendre en compte dans leurs projets. Ils hésitent de moins en moins à confier cette mission à des bureaux d'étude en acoustique. Un nouveau marché s'ouvre dans ce domaine et c'est dans cette perspective que s'inscrit ce mémoire.

L'intitulé de ce document « Etude pour une meilleure gestion des nuisances sonores et vibratoires dues à l'activité de chantier de construction de bâtiments », est un thème qui opère dans un contexte où des intérêts contradictoires se confrontent. Son objectif est de recueillir et d'apporter des éléments de réponse sur ce sujet et de dresser une sorte de feuille de route. Elle prendra en compte les divers aspects du problème et indiquera quelques solutions qu'il est envisageable de mettre en place afin de diminuer l'impact du chantier sur son environnement immédiat.

Mais avant toute chose, il convient de délimiter le périmètre de cette étude. En effet, il ne sera pas question de traiter des chantiers publics qui s'occupent soit de travaux du type V.R.D

(Voiries et Réseaux Divers), soit d'ouvrages d'art dit de génie civil comme la réalisation de ponts, d'écluses, de stations d'épurations, ou de mise en place de voies ferrés etc...

Cette étude s'intéresse uniquement aux bruits et vibrations en provenance de chantiers de construction de bâtiments en milieu urbain.

Elle débutera, dans un premier temps, par un bref rappel sur la physique acoustique et vibratoire qui précisera les termes et symboles qui vont être repris tout au long de ce document.

Ensuite, il sera question de se tourner vers les réglementations et normes en vigueur dans ces deux domaines afin de définir dans quel cadre l'étude d'impact du futur chantier pourra s'inscrire.

Puis, il sera énoncé succinctement les différentes phases d'un chantier afin d'en mieux connaître le fonctionnement ainsi que les différentes techniques susceptibles de créer des nuisances sonores et/ou vibratoires

Je poursuivrais par une étude de cas de nuisances sonores et vibratoires de chantier à laquelle j'ai participé et qui viendra illustrer ces propos.

Enfin, fort de cette expérience, il sera question d'élaborer une procédure permettant une meilleure gestion de ces nuisances qui impliquera les différents intervenants du chantier ainsi que des représentants du voisinage proche.

Quelques rappels de physique acoustique et vibratoire

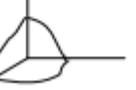
Dans cette première partie, il sera question de préciser certains éléments techniques qui vont être utilisés dans la suite de ce document ainsi que quelques rappels et définitions de termes couramment utilisés dans le domaine de l'acoustique et de la vibration.

1-1 Propagation acoustique

1-1-1 Propagation sphérique

En espace ouvert, si une source ponctuelle est omnidirectionnelle, le front d'onde acoustique sera sphérique et d'équation $S = 4\pi R^2$.

Cependant, les sources sonores qui vont nous intéresser dans la suite de ce document, seront toutes posées au niveau du sol. Le rayonnement se fera donc sur une partie de la sphère. Afin d'intégrer ce phénomène, un facteur de directivité Q est à prendre en compte pour le calcul de la surface de propagation de l'onde sonore :

	$Q=1$ pour une sphère complète
	$Q=2$ pour une demi-sphère (Ex : source sonore reposant sur le sol)
	$Q=4$ pour un quart de sphère (Ex : Source sonore entre le sol et un mur)
	$Q=8$ pour un huitième de sphère (Ex : source sonore dans un coin)

En connaissant la puissance acoustique P d'une source, le niveau d'intensité acoustique à la distance $d=R$ sera donné l'équation suivante :

$$L_I(d=R) = 10 \text{Log}_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) = 10 \text{Log}_{10} \left(\frac{QP}{S \cdot I_0} \right) = 10 \log \left(\frac{QP}{4\pi R^2 I_0} \right) = 10 \log \left(\frac{QP}{4\pi R^2 10^{-12}} \right)$$

$$L_I(d=R) = 10 \text{Log}_{10} \left(\frac{P}{10^{-12}} \right) - 10 \text{Log}_{10}(4\pi) + 10 \text{Log}_{10}(Q) - 20 \text{Log}_{10}(R)$$

$$L_I(d=R) = L_W - 11 \text{dB} + 10 \text{Log}_{10}(Q) - 20 \text{Log}_{10}(R)$$

Pour une demi-sphère, $Q=2$, on obtient :

$$L_I(d=R) = L_{WA} - 11 \text{dB}(A) + 10 \text{Log}_{10}(2) - 20 \text{Log}_{10}(R)$$

$$L_I(d=R) = L_{WA} - 8 \text{dB} - 20 \text{Log}_{10}(R)$$

Eq (1.1)

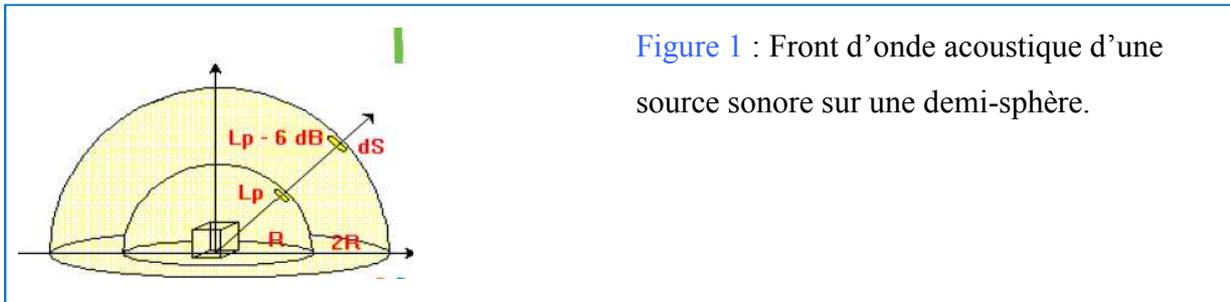


Figure 1 : Front d'onde acoustique d'une source sonore sur une demi-sphère.

1-1-2-Propagation cylindrique

Pour une source sonore linéique, comme une voie de circulation routière, la surface de propagation du front d'onde se fera sur un demi cylindre d'équation $S = \frac{1}{2}(2\pi RL) = \pi RL$ avec R et L respectivement le rayon et la longueur du cylindre en mètre.

La puissance acoustique P_L d'une source linéique est donnée en watt par mètre :

$$P_L = P / L$$

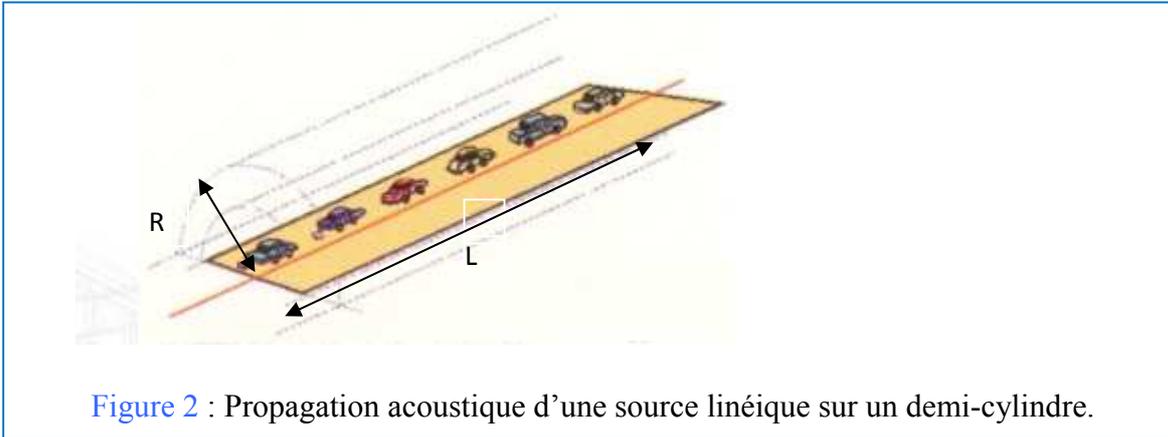


Figure 2 : Propagation acoustique d'une source linéique sur un demi-cylindre.

$$L_I(d=R) = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_L \times L}{S \cdot I_0} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_L \times L}{\pi R L I_0} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_L}{\pi R I_0} \right)$$

$$L_I(d=R) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_L}{I_0} \right) - 10 \log_{10} (\pi) - 10 \log_{10} (R)$$

$L_I(d=R) = L_{WA} - 5dB - 10 \log_{10}(R)$

Eq (1-2)

Si la distance d du point de mesure est multipliée par 2, il y aura une atténuation de 3 dB :

$L_I(d=2R) = L_{WA} - 5dB - 10 \log_{10}(R) - 10 \log_{10}(2) = L_I(d=R) - 3dB$

Eq (1-3)

1.1-3. Pondération acoustique

L'oreille humaine est sensible aux variations de pression de fréquences comprises entre 20 Hz et 20 kHz.

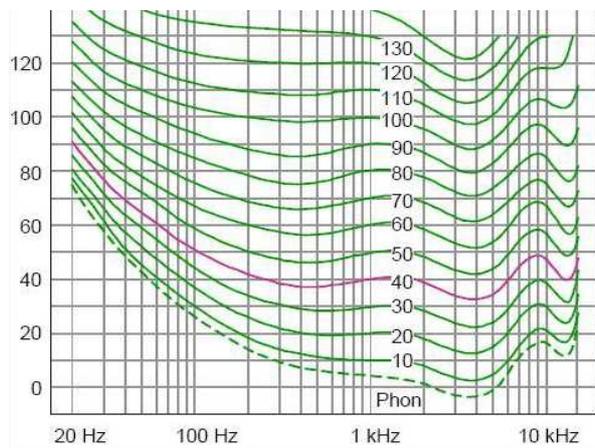
Cependant, cette sensibilité aux fréquences n'est pas identique sur tout le spectre. Elle sera plus sensible aux fréquences proches du timbre de la voix humaine.

Les recherches de Harvey Flechter et Munson, deux scientifiques américains, ont établi, en 1933, les courbes isosoniques correspondant à une sensation d'égale intensité. Elles sont indicées en Phon.

Elles mettent en évidence les variations de la sensation auditive avec la fréquence du signal sonore.

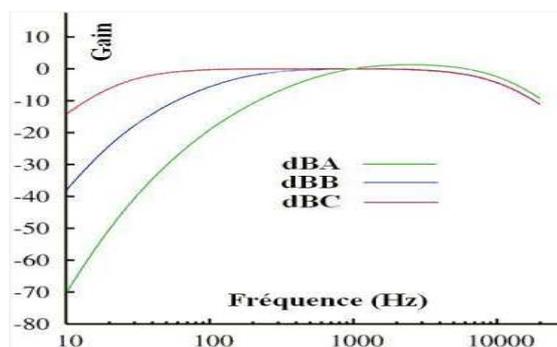
L'échelle, en Phon, est fixée par correspondance avec l'échelle en dB à la fréquence de 1 kHz. (Ex : 20 dB à 1 kHz correspond à la courbe isosonique de 20 phones).

Tableau I : Courbe isosonique de l'oreille humaine selon Flechter et Munson



Dans les mesures acoustiques, il va être tenu compte de cette courbe de réponse en fréquence de l'oreille humaine en intégrant, dans les sonomètres, des filtres de pondération.

Tableau II : Graphes des courbes de pondération A, B et C.



La pondération A (en dB(A)) est utilisée pour des niveaux sonores compris entre 25 et 55 dB.

La pondération B (en dB(B)) est adaptée pour les niveaux acoustiques compris entre 55 et 85 dB. Enfin, la pondération C (dB(C)) est recommandée pour les forts niveaux qui vont au-delà de 85 dB comme, par exemple, les mesures acoustiques dans l'aéronautique.

Celle utilisée actuellement dans le bâtiment est la pondération A.

En données chiffrées, la pondération A fréquentielle par bande d'octave est donnée dans le tableau suivant :

Tableau III : Pondération fréquentielle A par bandes d'octave.

Bandes d'octave (en Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Pondération A (en dB)	-15,5	-8,5	-3	0	+1	+1

1-1-4 Niveau équivalent

Lorsque le niveau instantané du bruit varie sans cesse (exemple : bruit de trafic), il est courant d'utiliser des indicateurs statistiques de bruit pour représenter l'impact « moyen » ou « intégré » du bruit.

Parmi ceux-ci, le **niveau équivalent** est la moyenne « énergétique » du bruit analysé sur un intervalle de temps d'observation de durée T.

Autrement dit, le **niveau équivalent** peut être défini comme le niveau d'un bruit constant dont l'énergie est la même que celle du bruit variable analysé, sur le même intervalle de temps T.

Si le sonomètre est réglé avec le filtre A, il indiquera le niveau équivalent pondéré A.

En posant : $\overline{p_A^2} = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} p_A^2 dt$ avec $T = t_2 - t_1$

$$L_{Aeq} = 10 \text{Log}_{10} \left(\frac{p_A^2}{p_0^2} \right)$$

Jusqu'à maintenant, il a été question de variation de pression dans un milieu de propagation atmosphérique gazeux. Cependant, des vibrations ont la possibilité également de se transmettre à travers d'autres médias. Celui qui va nous intéresser sera un milieu solide. Ce bref aperçu permettra de mieux comprendre les phénomènes vibratoires qui peuvent se créer dans les sols par certains travaux de chantiers et qui peuvent se transmettre dans les structures d'immeubles avoisinants.

1-2 Physique vibratoire

Les vibrations qui se transmettent dans les solides sont communément appelées vibrations solidiennes.

Il ne faut pas confondre la vitesse particulière qui est la vitesse du déplacement d'une particule du sol lorsque l'onde de vibration passe au point de mesure, de la vitesse de propagation correspondant à la vitesse de l'onde dans le média.

Toute vibration, selon la théorie de Joseph Fourier, peut se décomposer en une somme d'une série de vibrations harmoniques (ou sinusoïdales).

1-2-1 Paramètres vibratoires

Une vibration solidienne peut se caractériser soit par la valeur de son déplacement particulier D , soit par sa vitesse particulière V soit par son accélération particulière a . Ces trois caractéristiques sont interdépendantes. En effet, une vitesse est une variation du déplacement par rapport au temps et une accélération se définit comme la variation de la vitesse par rapport au temps. Voici les correspondances les reliant en se référant à un signal sinusoïdal :

-Le déplacement particulier D en fonction du temps :

$$D = \frac{V}{2\pi f} = \frac{a}{(2\pi f)^2} \quad (\text{en mètre : } m)$$

- la vitesse particulière V en fonction du temps qui est la dérivée du déplacement par rapport au temps ou l'intégration de l'accélération :

$$V = 2\pi f D = \frac{a}{(2\pi f)} \quad (\text{en mètre/seconde : } m.s^{-1})$$

-l'accélération particulière a en fonction du temps qui est la dérivée de la vitesse par rapport au temps ce qui correspond à la dérivée seconde du déplacement par rapport au temps:

$$a = 2\pi f V = (2\pi f)^2 D \quad (\text{en mètre/(seconde)}^2 : m.s^{-2})$$

Par conséquent, si la fréquence et l'amplitude d'un de ces trois paramètres sont connues (par exemple la vitesse V), les deux autres peuvent s'en déduire soit par différenciation (en multipliant le déplacement D par $2\pi f$), soit par intégration (en divisant l'accélération a par $2\pi f$).

1-2-2 Niveaux vibratoires

Dans la pratique, lors des mesures sur site, on utilise des transducteurs du type accéléromètre ou vélocimètre pour mesurer respectivement soit l'accélération soit la vitesse particulière.

D'après la norme ISO 1683-2 (1983) *Evaluation of human exposure to whole-body vibration, part 2: continuous and shock induced vibration in buildings (1 to 80 Hz)*, les niveaux correspondants sont définis comme suit :

-Niveau d'accélération vibratoire :

$$L_a = 20 \text{Log}_{10} \left(\frac{a}{a_0} \right) \quad \text{avec} \quad L_a \text{ le niveau en accélération}$$

a l'accélération efficace mesurée

a_0 valeur de l'accélération de référence = $1 \mu\text{m.s}^{-2} = 10^{-6} \text{m.s}^{-2}$

-Le niveau de vitesse vibratoire :

$$L_v = 20 \text{Log}_{10} \left(\frac{V}{V_0} \right) \quad \text{avec} \quad L_v \text{ le niveau en vitesse}$$

V la vitesse efficace mesurée

V_0 valeur de la vitesse de référence = $1 \text{nm.s}^{-1} = 10^{-9} \text{m.s}^{-1}$

(Une autre valeur de $V_0 = 5.10^{-8} \text{m.s}^{-1}$ est également utilisée dans certains pays)

-Le niveau de déplacement vibratoire :

$$L_d = 20 \text{Log}_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad \text{avec} \quad L_d \text{ le niveau de déplacement}$$

d la valeur efficace du déplacement mesurée

d_0 la valeur du déplacement de référence = $1 \text{pm} = 10^{-12} \text{m}$

- •Ce bref récapitulatif de physique acoustique et vibratoire va permettre de mieux comprendre les phénomènes de nuisance rencontrés sur un chantier et qui vont être développés de manière plus précise dans les parties qui vont suivre. Mais avant toute chose, il va être question de savoir si déjà, au niveau des réglementations ou normes existantes dans ce domaine, des obligations sont à respecter par les maîtres d'ouvrage, commanditaires des travaux.

Réglementation, normalisation dans les domaines du bruit et des vibrations

Depuis la création des institutions européennes, il y a une volonté d'harmoniser les législations notamment celles qui ont trait à la protection des personnes dans leur environnement proche. Le bruit et les vibrations sont des nuisances qui peuvent porter atteinte à la santé de l'individu. Les institutions européennes ont donc voulu édicter des règlements qui puissent permettre de prévenir les risques sanitaires éventuels.

Dans la littérature traitant de ce sujet, il est fait référence à la réglementation européenne ainsi que sa retranscription en droit français. Afin d'éclaircir la situation, le lignage du texte sera précisé.

Lorsqu'il n'y a aucune réglementation qui existe dans un domaine, j'ai réalisé une recherche dans les normes internationales ISO ou européennes.

Sur un chantier, deux types de population sont à préserver : d'une part les personnes travaillant sur le site, appelées communément compagnons et, d'autre part, le voisinage proche situé à sa périphérie.

2-1-Protection du personnel sur le chantier

2-1-1 Textes sur le bruit

La législation relative à la prévention du bruit en milieu de travail repose sur la **directive européenne N° 2003/10/CE du 6 février 2003**. Ce texte fixe des prescriptions minimales en matière de protection des travailleurs contre les risques pour leur santé et leur sécurité résultants ou susceptibles de résulter d'une exposition au bruit, notamment le risque pour l'audition.

Cette directive a été transposée en droit français par le décret N° 2006-892 du 19 juillet 2006 accompagné de son arrêté d'application en date du 19 juillet 2006. Ce texte a ensuite été intégré dans le **nouveau code du travail** sous les **articles R 4431-1 à R4431-3**.

Ces textes précisent les mesures de protections collectives obligatoires à respecter notamment en ce qui concerne l'évaluation des risques liés au bruit, les valeurs limites d'exposition du travailleur ainsi que les seuils d'exposition déclenchant des actions de prévention.

L'arrêté du 19 juillet 2006 ci-dessus visé, précise les termes utilisables dans cette réglementation à savoir :

1-Le niveau de pression acoustique de crête L_{pc} : c'est le niveau de la valeur maximale de la pression acoustique instantanée mesurée avec la pondération fréquentielle C (Voir § 1-2-3) et une constante de temps en mode « Fast » à savoir 0,125 seconde :

$$L_{pc} = 20 \text{ Log} \left(\frac{P_c}{P_0} \right)$$

Eq 2-1

avec

P_c : la valeur maximale durant la journée de travail de la pression acoustique instantanée, mesurée avec la pondération fréquentielle C.

P_0 : niveau de pression de référence de $2 \cdot 10^{-5}$ pascals

2- Le niveau d'exposition quotidienne au bruit LEX,8h : Il est calculé en effectuant la moyenne pondérée dans le temps des niveaux d'exposition au bruit pour une journée de travail nominale de huit heures.

$$\text{LEX}_{,8h} = \text{LAeq}_{,T_e} + 10 \log_{10} (TE/TO)$$

Eq 2-2

TE : est la durée totale effective de la journée de travail ;

TO : est la durée de référence, fixée à 8 heures.

Exemple : Soit un compagnon qui travaille sur une machine bruyante pendant 3 heures avec un $\text{LAeq}_{3\text{heures}} = 78 \text{ dB(A)}$ sur une journée d'activité. Cela correspondra à une exposition journalière LEX rapportée sur 8 heures de :

$$\text{LEX}_{,8h} = \text{LAeq}_{3\text{heures}} + 10 \log_{10}(3/8) = (78 - 4,25) \text{ dB(A)} = 73,74 \text{ dB(A)} \approx 74 \text{ dB(A)}$$

Les **articles R 4431-2 à R4431-3** du code du travail précisent les normes relatives à l'exposition au bruit du travailleur. Elles sont résumées dans le tableau synthétique suivant :

Tableau IV : Seuils d'exposition au bruit du travailleur.

Seuils d'exposition	Action de l'employeur
$80 \text{ dB(A)} < \text{LEX}, 8 \text{ heures} \leq 85 \text{ dB(A)}$ Et / ou $135 \text{ dB(C)} < L_{pc} \leq 137 \text{ dB(C)}$	Mise à disposition des travailleurs de Protecteurs Individuels Contre le Bruit (PICB)
$85 \text{ dB(A)} < \text{LEX}, 8 \text{ heures} \leq 87 \text{ dB(A)}$ Et / ou $137 \text{ dB(C)} < L_{pc} \leq 140 \text{ dB(C)}$	Port de PICB obligatoire
$87 \text{ dB(A)} < \text{LEX}, 8 \text{ heures}$ Et/ou $140 \text{ dB(C)} < L_{pc}$	Valeurs seuils au niveau des oreilles du compagnon à ne jamais dépasser avec le port des PICB

Pour le protocole de mesure du bruit en milieu du travail, la norme Afnor NF 31 084 est applicable pour le calcul de l'exposition au bruit et la norme NF EN ISO 4869-2 (§7 et §8) pour la détermination de l'exposition effective en cas de port de PICB.

2-1-2 Textes sur les vibrations

La législation européenne sur l'exposition aux vibrations au travail est définie dans la **directive européenne 2002/44/CE du 25 juin 2002**. Ce texte précise les limites d'exposition aux vibrations transmises d'une part au système main-bras et d'autre part à l'ensemble du corps afin de prévenir des maladies professionnelles (Ex : arthrose du coude, affections chroniques du rachis lombaire).

Il a été intégré dans la législation française par la promulgation du décret 2005-746 du 4 juillet 2005 accompagné de son arrêté d'application du 6 juillet 2005. Les éléments de ce texte ont été intégrés dans le **nouveau code du travail sous les articles R 4443-1 et R R4443-2**. Ces articles précisent que l'exposition journalière d'un travailleur aux vibrations mécaniques, rapportée à **une période de référence de 8 heures** ($a_j(8) = \sqrt[2]{\frac{1}{8} \sum_{i=1}^n a_{j_i} T_i}$) ne peut dépasser, les valeurs limites d'exposition aux **accélération**s suivantes :

- pour les vibrations transmise aux mains et aux bras : $a_h(8) = 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
- pour l'ensemble du corps : $a(8) = 1,15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

Ces données seront donc à prendre en compte d'une part lors du phasage des travaux pour la durée d'exposition aux vibrations des compagnons et, d'autre part, dans le choix des caractéristiques techniques des machines retenues pour le chantier.

Synthèse des seuils maxima acoustiques et vibratoire à ne pas dépasser en milieu du travail :

Tableau V : Tableau récapitulatif des seuils maxima à respecter par la législation du travail.

Protection des compagnons sur le chantier	Textes en vigueur	Seuils maxima à ne jamais dépasser sur une période de 8 heures
Bruit	Code du travail : articles R 4431-2 à R4431-3	LEX, 8h = 87 dB (A) Lpc = 140 dB(C).
Vibrations	Code du travail : R 4443-1 et R R4443-2.	$a_h = 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ $a = 1,15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

2-2 Protection du voisinage

2-2-1 Textes traitant du bruit

Pour la protection du voisinage contre les bruits de chantier, **le code de la santé publique** précise les éléments suivants dans son **article R 1334-36** :

« Si le bruit mentionné à l'article R. 1334-31 a pour origine un chantier de travaux publics ou privés, ou des travaux intéressant les bâtiments et leurs équipements soumis à une procédure de déclaration ou d'autorisation, l'atteinte à la tranquillité du voisinage ou à la santé de l'homme est caractérisée par l'une des circonstances suivantes :

1° Le non-respect des conditions fixées par les autorités compétentes en ce qui concerne soit la réalisation des travaux, soit l'utilisation ou l'exploitation de matériels ou d'équipements ;

2° L'insuffisance de précautions appropriées pour limiter ce bruit ;

3° Un comportement anormalement bruyant. »

Cette responsabilité du respect du voisinage incombe au maître d'ouvrage, à savoir la personne (personne morale, privée ou publique) pour le compte de laquelle sont réalisés les ouvrages de bâtiment ou d'infrastructure. Les autorités compétentes peuvent être soit les élus des collectivités territoriales, en application de l'**article L2213-4 du code général des collectivités territoriale**, soit les représentants des services déconcentrés de l'Etat (Préfet de la Région depuis la dernière réforme structurelle, les préfetures départementales ayant été dissoutes).

Des arrêtés préfectoraux ou municipaux peuvent ainsi apporter des prescriptions complémentaires au code de la santé publique en particulier sur les horaires et les périodes d'activités des chantiers sur l'année.

On peut citer comme exemple sur Paris, l'arrêté le Préfet de Police n° 01-16 855 du 29 octobre 2001, qui régleme les activités bruyantes sur la capital en précisant que les travaux sont interdits avant 7H00 et après 22H00 les jours et semaine, avant 8 heures et après 20 heures le samedi et interdits les dimanches et jours fériés sauf autorisation expresse après avis des services de police.

Par ailleurs, certains travaux considérés comme gênants peuvent être soumis à un **contrôle** à travers une **autorisation de travaux** ou encore **un permis de construire**.

Cependant, il n'y a pas de seuils acoustiques de référence définis pour la protection du voisinage. Dans la pratique, bien que non obligatoire, certaines études acoustiques se réfèrent à l'arrêté du 23 janvier 1997 relatif à la limitation des bruits émis dans l'environnement par les Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE).

Dans son article 3, des seuils sont fixés pour la protection du voisinage. Les valeurs données à ne pas dépasser en limite de propriété (de l'établissement testé) est fixé à 70 dB(A) en période diurne (7 heures – 22 heures) et 60 dB(A) en période nocturne (22 heures – 7 heures).

Il est à noter que ces critères concernent des installations fixes et pérennes, ce qui n'est pas le cas pour un chantier qui n'est que temporaire même si sa durée peut parfois s'étendre sur plusieurs années consécutives.

Ces données peuvent être des points de repère pour une étude d'impact acoustique.

2-2-2 Textes traitant des vibrations

Les vibrations peuvent être une source de nuisances pour le voisinage proche ainsi que pour la structure du bâtiment.

Aucune réglementation n'existe en France dans ce domaine lorsque les sources de vibrations proviennent de l'activité d'un chantier. En revanche, des textes réglementaires sur les ICPE ainsi que la consultation de certaines normes peuvent apporter quelques éléments de réponses à cette interrogation.

2-2-2-1 La gêne vibratoire

Si l'on se réfère à la **sensibilité humaine** aux vibrations, le tableau ci-joint donne quelques correspondances entre des valeurs de vitesse de vibration et la sensation perçue sur une gamme de fréquence allant de 8 à 80 Hz (NEEDHAM et BROOK (1998)) :

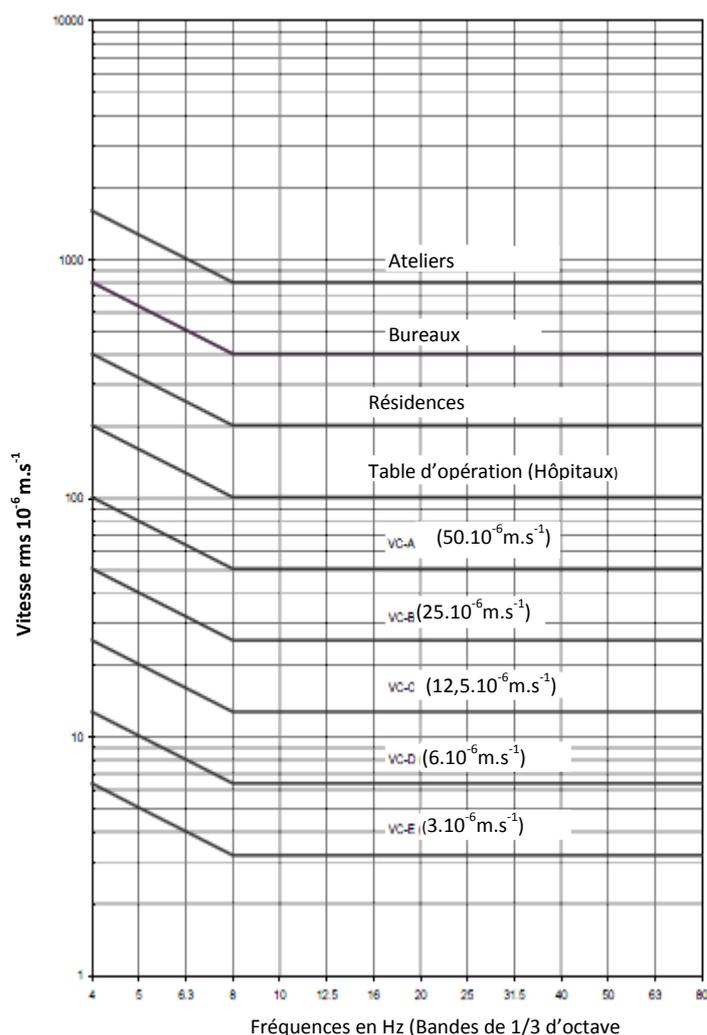
Tableau VI : Vitesse de vibration et degré de perception

Niveau approximatif de vitesse de vibration (en mm.s⁻¹)	Degré de perception
0,10	Non perceptible
0,15	Seuil de perception
0,35	Juste perceptible
1	perceptible
2,2	Facilement perceptible
6	Fortement perceptible
14	Très fortement perceptible

Par ailleurs, il existe plusieurs normes différentes relatives à la sensibilité vibratoire humaine qui peuvent servir de base de travail pour une étude d'impact.

La première se réfère à des courbes VC (Vibration Criterion) relatives à des critères vibratoires suivant le type de bâtiment au regard de sa destination ou du matériel sensible qu'il peut héberger.

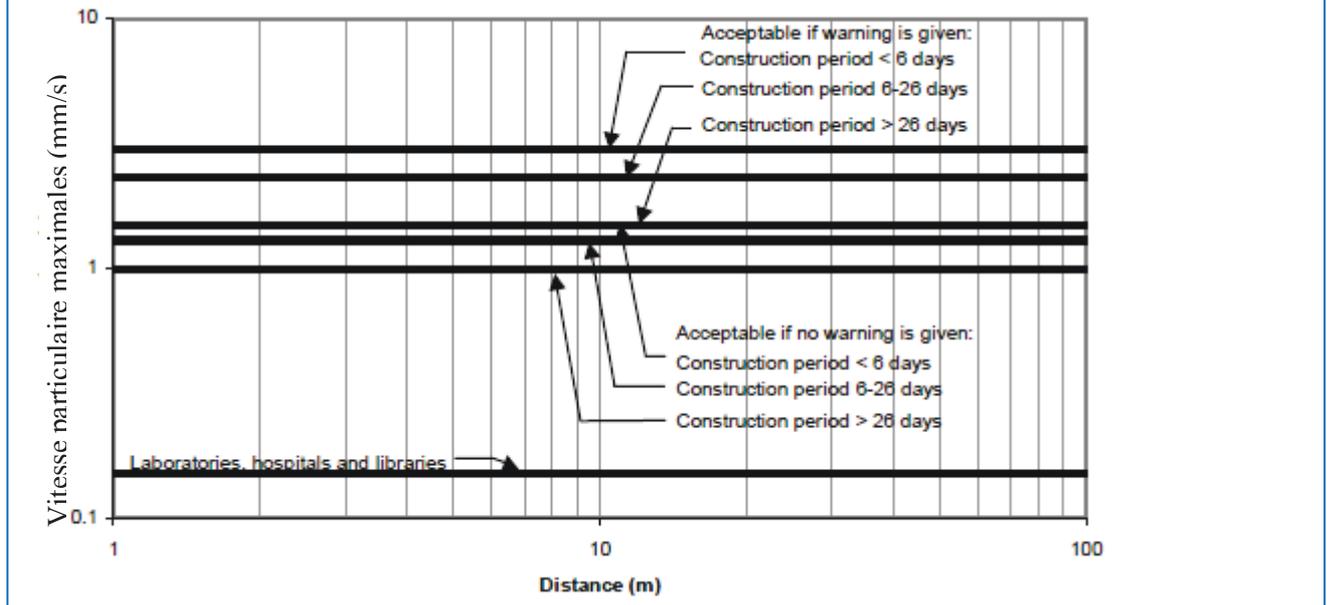
Tableau VII : Courbe VC (Vibration Criterion) suivant la nature du site ou du matériel à protéger (BS 5228-2 (2009)).



Courbe VC	Niveau-max. (10^{-6} m.s^{-1})	Description du site à protéger
Ateliers	800	Vibrations qui peuvent être ressenties distinctement. Ateliers et zone non sensible
Bureau	400	Vibration ressentie. Immeuble de bureaux
Résidences	200	Vibration à la limite d'être ressentie. Appropriée pour les zones dortoirs, les salles d'ordinateurs et les équipements de microscopes basse résolution (X20)
VC-A	50	Vibrations non ressenties. Zone dortoirs sensibles (Hôpitaux, crèches...). Microscopes (X100) et autres équipements sensibles
VC-B	25	Microscopes (X400), balances sensibles
VC-C	12,5	Lithographie
VC-D	6	Microscope électronique
VC-E	3	Systèmes laser

D'autres recherches sur le sujet ont été réalisées. On peut lier le niveau de gêne vibratoire à la durée d'exposition. Sur le tableau VIII sont répertoriés les niveaux vibratoires acceptables et inacceptables au regard de la durée de vie du chantier. Plus la période d'activité est longue, moins le niveau vibratoire admissible est important.

Tableau VIII : Valeurs limites de vibration à respecter pour le confort humain selon l'Eurocode 3 (WHITE *et al* (2002)).



2-2-2-2 La protection des bâtiments :

En France, la circulaire du 23 juillet 1986 relative aux vibrations mécaniques émises dans l'environnement par les ICPE, précise des valeurs de vitesse vibratoire en $mm.s^{-1}$ à ne pas dépasser pour la protection des bâtiments.

Les types de configuration définis dans le tableau IX, à savoir résistante, sensible et très sensible, sont définis suivants plusieurs critères qui sont le type de construction (architecture et matériaux), la nature des fondations, et la nature du terrain sur lesquelles elles reposent.

Par ailleurs la nature de la vibration est à prendre en compte comme suit.

Est considérée comme vibration impulsionnelle toute vibration dont la durée d'une émission est inférieure à 500 millisecondes et l'espacement de temps entre deux émissions successives est supérieur à une seconde. Tous les autres types de vibrations ne correspondant pas à ces critères seront considérés comme continus.

Les dispositions de cette circulaire doivent à terme être reprises dans une Norme Française NF de la série E90.

Tableau IX : Vitesses limites (en $mm.s^{-1}$) pour la protection des bâtiments selon la circulaire du 23 juillet 1986.

Tableau de vitesse limite (mm/s)

Type de configuration	Fréquence		
	De 1 à 8 Hz	De 8 à 30 Hz	De 30 à 100 Hz
Résistante	5	6	8
Sensible	3	5	6
Très sensible	2	3	4

Vibrations continues

Type de configuration	Fréquence		
	De 1 à 8 Hz	De 8 à 30 Hz	De 30 à 100 Hz
Résistante	8	12	15
Sensible	6	9	12
Très sensible	4	6	9

Vibrations
impulsionnelles

D'autres normes traitant de ce sujet sont accessibles. Le tableau X, issu de AKLE (2006), compare les différents critères d'évaluation des seuils de vibrations de normes de différents pays.

Tableau X : Comparatif des critères d'évaluation des seuils de vibrations de différentes normes (AKLE (2006)).

Origine	Pays	Norme	Date de création	Inspiration	Paramètres pris en compte							
					Type de vibrations :							
					I : Impulsionnelle IP : Impulsionnelle Périodique C : Continue							
					Fréquence	Vitesse totale	Composantes de vitesse	Distance	Type de terrain	Type de bâtiment	Type de vibrations	Type d'activité
Pays européens	Allemagne	DIN 4150-3	1975	-	Oui	Non	Oui	Non	Non	Oui	I, IP	Non
	Portugal	NP 2074	1983	Allemande	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	I	Oui
	France	Circulaire du 23/07/1986	1986	-	Oui	Non	Oui	Non	Non	Oui	I, IP, C	Oui
	Suède	SS4604866	1991	-	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	I, IP	Oui
	Italie	UNI 9916	1991	Allemande	Oui	Non	Oui	Non	Non	Oui	I, IP	Non
	Suisse	SN 640312a	1992	-	Oui	Oui	Non	Non	Non	Oui	I, C	Non
	Angleterre	BS 7385	1993	-	Oui	Non	Oui	Non	Non	Oui	I, IP	Non
		BS 5228	1997	-	Oui	Non	Oui	Non	Non	Oui	IP, C	Non
	Espagne	UNE 22-381	1993	-	Oui	Non	Oui	Non	Non	Oui	I, IP	Non
Ecosse	PAN 50	2000	Anglaise	Oui	Non	Oui	Non	Non	Oui	I, IP	Non	
Pays hors d'Europe	USA	USBN	1980	-	Oui	Non	Oui	Non	Non	Oui	I, IP	Non
		OSM 817-67	1983	-	Oui	Non	Oui	Non	Non	Oui	I, IP	Oui
	Brésil	NBR 9653	1983	-	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non	I, IP	Non
	Inde	CMRI	1991	-	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Oui	I	Non
	Australie	AS 2187	1993	Anglaise	Oui	Non	Oui	Non	Non	Oui	I, IP	Oui

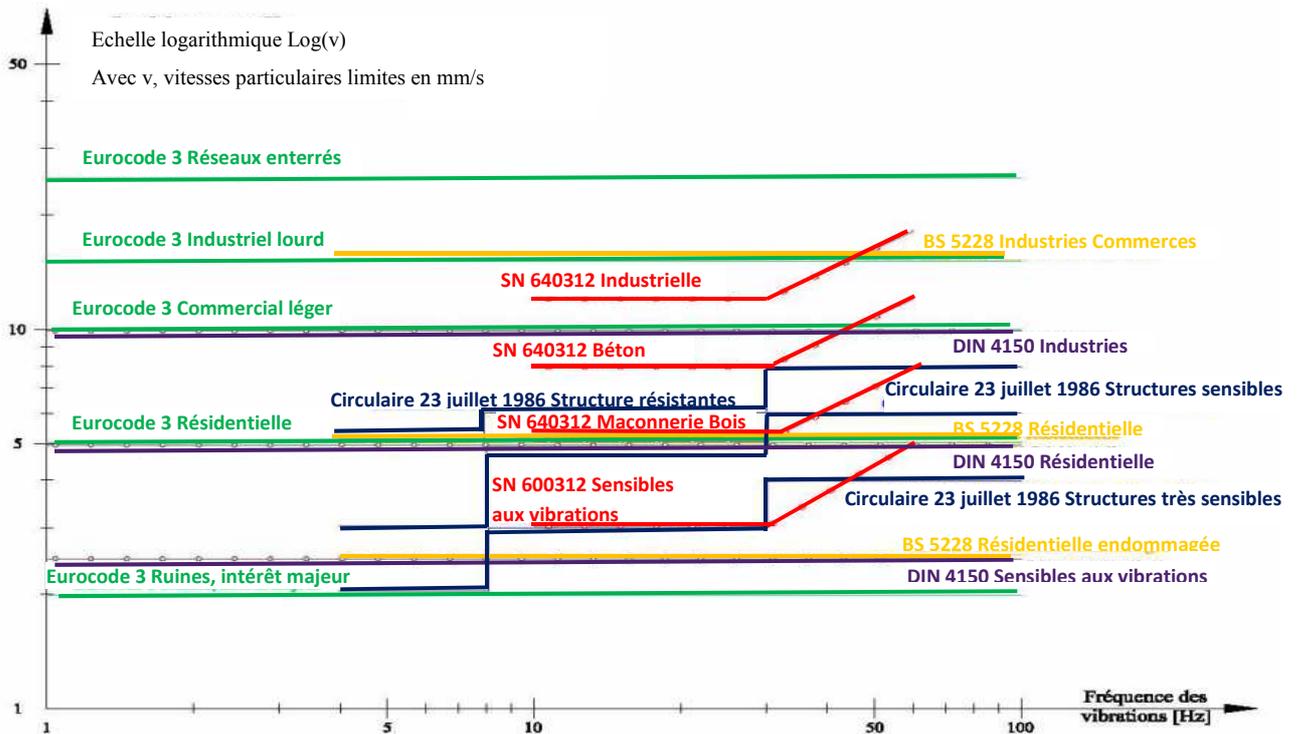


Figure 3 : Comparaison des différentes normes relatives aux modules de vitesse particulière limite pour des vibrations continues (ROCHER-LACOSTE, 2008).

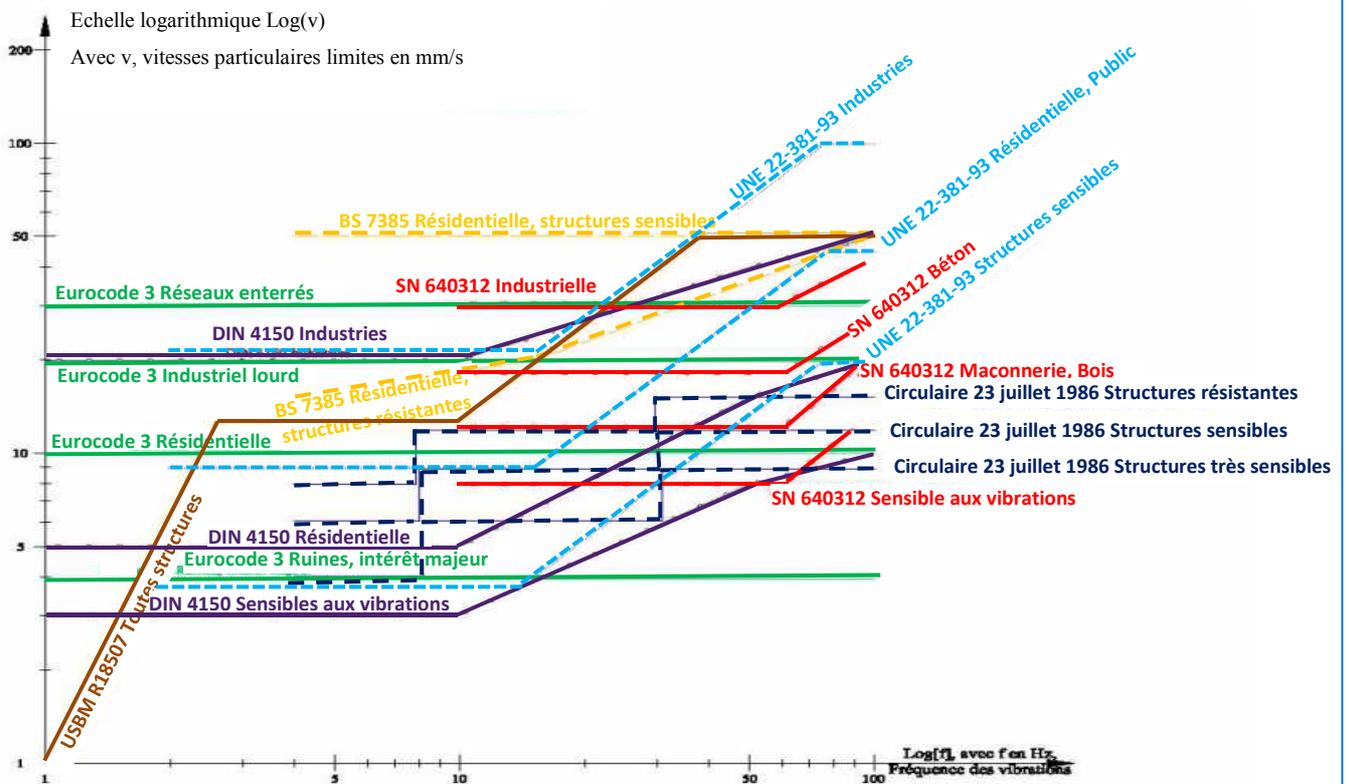


Figure 4 : Comparaison des différentes normes relatives aux modules de vitesse particulière limite pour des vibrations intermittentes (ROCHER-LACOSTE, 2008)

Analyse critique des différentes normes

Les récapitulatifs des normes en matière de vibration de différents pays, font apparaître des disparités. Ainsi, sur les figures 3 et 4, les catégories retenues pour chacune des normes énoncées ne sont pas toutes identiques. Ainsi, pour la norme anglaise BS 5228, il est question de la nature de l'activité que va abriter le bâtiment à savoir s'il est résidentiel ou industriel. En revanche, pour la norme suisse SN 640 312, elle y mêle également les matériaux constituant le bâtiment à savoir si la structure est en béton ou en maçonnerie bois.

Par ailleurs, certaines normes vont tenir compte de la qualité de terrain tandis que d'autres ne s'intéresseront qu'à la distance à la source, etc...

Un autre point important concerne le critère de mesure des vitesses retenues. Sur un terrain, une onde de surface, onde souvent mesurée par des transducteurs tri-axes, disposent de trois coordonnées orthogonales correspondantes respectivement aux trois directions de l'espace à savoir deux horizontales et une verticale. Certaines normes prennent comme seuil de mesure le maximum de ces trois composantes tandis que d'autres prennent leur moyenne géométrique.

Pour la circulaire française, les seuils annoncés sont des vitesses maximales à respecter individuellement pour chacune des 3 composantes du vecteur vitesse particulière.

Il est à préciser également que la norme italienne mesure des accélérations plutôt que des vitesses particulières.

Cependant, il existe également des points communs entre certaines normes.

Concernant les seuils des vitesses particulières continues, l'Eurocode 3, la norme anglaise BS 5228 et allemande DIN 4150 sont identiques concernant le critère résidentiel, et ces deux dernières sont également identiques pour les résidences sensibles ou endommagées.

Par ailleurs, que ce soit en vibrations continues ou intermittentes, la circulaire française annonce des seuils à respecter qui sont assez sécuritaires vis-à-vis des autres normes.

Conclusions : La comparaison des différentes normes montre que les paramètres utilisés et les valeurs limites varient d'un pays à l'autre.

A l'heure actuelle, il ne semble pas y avoir d'effort d'harmonisation ce qui rend d'autant plus difficiles les comparaisons entre les différents documents. Ceci ne favorise donc pas l'échange des données ou des expériences et freine quelque peu l'évolution des normes dans ce secteur de recherche.

Remarque^(*) : Les Eurocodes sont nés d'une initiative de la Commission Européenne qui, dès 1975, a lancé un programme d'action visant à éliminer les obstacles techniques à l'harmonisation des spécifications touchant à la conception des structures de construction. En 1989, cette mission technique fut confiée au Comité Européen de Normalisation qui a, à ce jour, édité 10 Eurocodes qui devront, progressivement, être intégrés sous forme de normes nationales par les pays membres de l'Union Européenne. L'Eurocode 3 s'applique au calcul des structures en acier.

2-3 Réglementation sur les matériels de chantier

2-3-1 Réglementation sur le bruit

L'**arrêté du 11 avril 1972** fixe le niveau sonore maximum des groupes moto-compresseur sur le marché français à 85 dB(A) mesuré à 1 mètre.

L'**arrêté du 10 décembre 1975** oblige que toute installation de groupes électrogènes de puissance ne doit pas se situer à moins de 100 mètres d'immeuble d'habitation.

Puis le **décret du 23 janvier 1995**, de manière plus générale, fixe les prescriptions applicables pour prévenir et réprimer, s'il y a lieu, les émissions sonores des objets et engins bruyants dont les machines de chantier font partie.

Ensuite la législation devient dans ce domaine à consonance européenne. Tout d'abord, la **directive européenne 2000/14/CE du 8 mai 2000**, fixe les exigences essentielles de sécurité et de santé relatives aux nuisances sonores dans l'environnement des matériels destinés à être utilisés à l'extérieur des bâtiments. Elle a été intégrée dans le droit français par l'**arrêté du 18 mars 2002**. Ce texte européen a été modifié par la directive 2005/88/CE du 14 décembre 2005 qui fut retranscrit en droit français par l'**arrêté du 22 mai 2006**.

Ces textes concernent les matériels neufs mis sur le marché européen. Ils déterminent, selon les types de matériels concernés, les exigences relatives aux niveaux de puissances acoustiques admissibles. Cette directive est largement consacrée aux engins de chantier.

Elle distingue deux groupes d'engins : le premier groupe doit respecter des niveaux de puissance acoustique admissible limites à ne pas dépasser. Il s'agit d'engin particulièrement bruyant.

Le second groupe doit uniquement préciser ce niveau de puissance maximum qu'ils peuvent atteindre. Elle impose également la mise en place d'une plaque sur chaque engin sur laquelle doit figurer le sigle « C.E » ainsi que sa puissance acoustique L_{WA} en dB(A).

Il est à noter que le symbole d'écriture est le dB, mais il correspond à des dB(A).

Par ailleurs, les services municipaux sont habilités à surveiller le chantier. Ils peuvent, à tout moment,

vérifier l'homologation et la conformité des engins à cette réglementation. A ce titre, tout utilisateur doit pouvoir présenter le certificat de conformité CE.

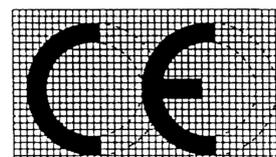


Figure 5 : Etiquetage « C.E ».



Figure 6 : Etiquetage de la puissance acoustique sur les engins de chantier.

Ces documents sont fournis par le fabricant lors de l'achat du matériel.

En cas de non-respect de la réglementation sur les émissions sonores des engins, les agents habilités de la mairie ou les fonctionnaires de police pourront ordonner l'arrêt immédiat des matériels et engins concernés jusqu'à la mise en conformité des appareils mis en cause.

Il est à noter que suivant le type d'engin, la procédure de mesure de la puissance acoustique est différente. Pour les conditions de mesurage, ce sont les normes ISO 3744 et ISO 3746 qui sont visées et donc applicables. L'intitulé de ces normes est la détermination des niveaux de puissance acoustique et des niveaux d'énergie acoustique émis par les sources de bruit à partir de la pression acoustique libre sur plan réfléchissant.

Le premier texte précise la méthode d'expertise pour des conditions approchant celles du champ libre.

Le second définit la méthode de contrôle employant une surface de mesure enveloppante au-dessus d'un plan réfléchissant.

La mesure des niveaux sonores des moteurs de ces engins est souvent réalisée lors d'un fonctionnement en puissance maximale. Ces conditions auront un impact et seront reprises lors de l'évaluation des niveaux sonores de l'activité d'un chantier qui sera définie en annexe A3 de ce document.

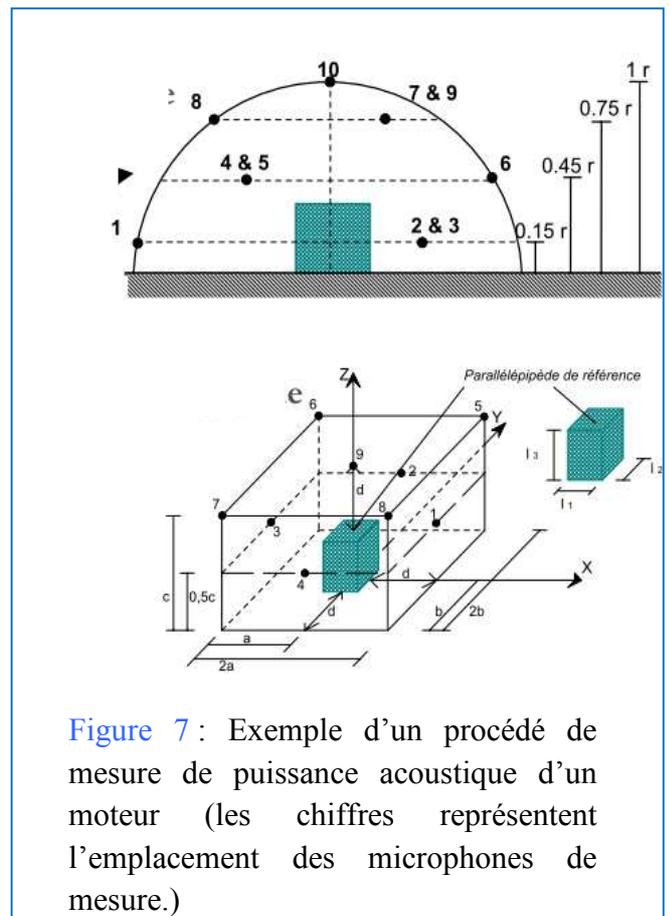


Figure 7 : Exemple d'un procédé de mesure de puissance acoustique d'un moteur (les chiffres représentent l'emplacement des microphones de mesure.)

2-3-2 Réglementation sur les vibrations :

Aucune réglementation sur les niveaux vibratoires n'existe actuellement pour la conception et la mise sur le marché européen des engins de chantier

Tableau XI : Synthèse générale sur la réglementation et les normes applicables sur un chantier

Objet	Nature de la nuisance	Textes réglementaires en vigueur	Textes de référence mais non obligatoire
Protection du personnel travaillant sur le chantier	Le Bruit	Code du travail : articles R 4431-2 à R4431-3	-
	Les Vibrations	Code du travail : R 4443-1 et R R4443-2.	-
Protection du voisinage proche du chantier	Le Bruit	Code de la santé publique : article R 1334-36	-
	Les Vibrations	Aucuns	Norme ISO 2631-(1997) partie 2 (Internationale) Norme DIN 4150-3:1999 (Allemande) Norme BS 7385-2:1993 (Anglaise) NS 8141:2004 (Norvégienne) etc...
Protection des bâtiments proche du chantier	Les Vibrations	Aucuns	Circulaire du 23 juillet 1986 relative aux vibrations mécaniques émises dans l'environnement par les ICPE
Engins de chantier	Le Bruit	Arrêté du 18 mars 2002 modifié et complété par l'arrêté du 22 mai 2006.	-
	Vibration	-	-

2-4 Jurisprudence

La jurisprudence concernant les plaintes du voisinage, faisant suite à une exposition à des nuisances sonores en provenance d'une activité de chantier, est très variée, même parfois contradictoire, et il reste difficile de trouver une ligne directrice sur laquelle s'appuyer.

En effet, cette problématique nécessite de répondre dans un premier temps, à deux questions :

- La nature de l'infraction ;
- La détermination des responsabilités relatives aux différents acteurs du chantier.

Dans un second temps, quelques cas de jurisprudence seront précisés.

2-4-1 La nature de l'infraction :

Pour qu'il y ait infraction, il faut qu'elle soit établie par rapport à un article soit de loi, soit réglementaire qui n'aurait pas été respecté par le contrevenant.

Or dans ce domaine, la loi est relativement floue. Reprenons les termes de l'article R1334-36 du code de la santé publique visé au §2-2-1, qui explicite les causes d'infractions qui sont les suivantes :

« Si le bruit mentionné à l'article R. 1334-31 a pour origine un chantier de travaux publics ou privés, ou des travaux intéressant les bâtiments et leurs équipements soumis à une procédure de déclaration ou d'autorisation, l'atteinte à la tranquillité du voisinage ou à la santé de l'homme est caractérisée par l'une des circonstances suivantes :

1° Le non-respect des conditions fixées par les autorités compétentes en ce qui concerne soit la réalisation des travaux, soit l'utilisation ou l'exploitation de matériels ou d'équipements ;

2° L'insuffisance de précautions appropriées pour limiter ce bruit ;

3° Un comportement anormalement bruyant. »

La première infraction est claire. L'autorisation pour la réalisation des travaux peut être sujette à des contraintes supplémentaires exigées par l'autorité publique compétente. Le fait d'accepter le permis entraîne également celui des exigences qui y sont associées et qui peuvent s'exprimer notamment dans le domaine de la gestion des nuisances sonores et vibratoires du futur chantier.

Ce document fait office de contrat entre deux entités. En cas de plainte d'un tiers, la juridiction civile peut, dans ce cas de figure, vérifier le respect des clauses contractuelles

avec les faits énoncés par la partie plaignante et décider de la mise en cause ou pas de la responsabilité du maître d'ouvrage.

Pour les deux autres cas d'infraction, la situation est plus critique. En effet, l'insuffisance des précautions ou le comportement anormalement bruyant est plus difficile à mettre en évidence puisqu'il n'existe aucune norme obligatoire ni aucune réglementation à respecter en la matière. Les cas les plus couramment rencontrés sont par exemple l'oubli de fermeture du capot acoustique des stations de moteurs compresseur lors de l'utilisation des marteaux piqueur. Cependant, la caractérisation de ce type d'infraction est à l'appréciation du juge qui n'est pas forcément expert dans les différentes techniques de construction ou de démolition. L'avis d'experts pourra être demandé ce qui retardera la décision de justice.

2-4-2 Détermination des responsabilités

Sur un chantier, les dommages créés par l'activité de chantier ne devraient pas forcément être de la responsabilité du maître d'ouvrage. En effet, l'article 1384 du Code Civil précise :

« On est responsable non seulement du dommage que l'on cause par son propre fait, mais encore de celui qui est causé par le fait des personnes dont on doit répondre, ou des choses que l'on a sous sa garde »

Or, la garde d'un chantier est souvent confiée soit au maître d'œuvre soit au chef de chantier. La responsabilité du maître d'ouvrage ne peut normalement être mise en cause que s'il est propriétaire du bâtiment en construction. Or cette situation n'arrive qu'à la réception des travaux, lorsqu'ils sont terminés et que l'édifice livré est accepté au regard du respect du cahier des charges de l'ouvrage.

Cependant cette clause de subrogation qui transfère la responsabilité du maître d'ouvrage au maître d'œuvre ou à l'entreprise responsable du chantier, est rarement retenue par les juridictions civiles.

En effet, la jurisprudence ne considère pas un chantier comme une chose (C.A. de Paris, 7 mai 1988, Galuz c. S.N.C. université foncière, *Juris-Data* n° 021025) et il ne peut donc pas être soumis à la garde d'un tiers, notamment des entreprises de construction.

Le maître d'ouvrage reste donc le seul responsable lors d'une procédure civile à l'encontre d'un chantier.

2-4-3 Synthèse des jurisprudences

La jurisprudence dans ce domaine est assez éparse et les éléments retenus ou rejetés par les différentes juridictions concernant « un inconvénient excédant les obligations normales du voisinage » sont divers.

2-4-3-1 Éléments à charge retenus:

Constituent ainsi des inconvénients anormaux de voisinage :

● **une durée excessive de travaux.** La responsabilité de l'auteur de travaux est engagée dès lors que celui-là refuse de prendre en considération le trouble occasionné au voisinage, et cela depuis 5 ans (C.A. de Paris, 10 mai 1989, Reza c. Delorme) ; de même lorsque des travaux se prolongent depuis 10 ans (C.A. de Paris, 29 sept. 1981, Fritsch c. A.O.C.E.F.I., *Juris-Data* n° 024891) ;

● **le non-respect des recommandations formulées par des experts.** Le maître d'ouvrage qui, de manière délibérée, n'a pas suivi les réserves des experts quant aux bruits, doit réparer les troubles causés aux tiers (C.A. de Paris, 28 mars 1989, Cirimelle c. Guidez, *Juris-Data* n° 021190) ;

● **des bruits désagréables générés par un chantier aboutissant à la violation de l'article 1382 du Code Civil** qui dit que « Tout fait quelconque de l'homme, qui cause à autrui un dommage, oblige celui par la faute duquel il est arrivé à le réparer » (C.A. de Paris, 18 avril 1985, Mandelbaum c. S.C.I. de Forcy, *Juris-Data* n° 021642) ;

● **la violation d'un arrêté municipal** définissant les horaires des chantiers (C.A. de Paris, 6 juill. 1994, Amaro, c. Amouroux, *préc.*).

L'existence d'une faute n'est pas nécessaire pour qu'un trouble de voisinage soit sanctionné. La Cour de cassation a posé nettement le principe selon lequel le trouble anormal de voisinage doit être sanctionné même en l'absence de faute (Cass. 2ème civ. 24 avr. 1989, n° 87-16.696 V, arrêt n° 893 D, Murer, Rueffli c. Cordier, Chevalet). Pour être plus précis, même si il y a respect des clauses contractuelles ou des techniques de construction, donc absence de faute « professionnelles », mais qu'il y a des nuisances reconnues comme excessives, le juge peut condamner le mis en cause.

Ce principe a été réaffirmé lors d'une demande de réparation consécutive à des nuisances occasionnées par un chantier (C.A. de Paris, 12 janv. 1999, Mutuelle du Mans Assurances Iard c. Voillot, *Juris-Data* n° 020049).

Quelques cas d'indemnisations :

- Cas des exploitants d'activités commerciales : ainsi, un restaurateur est indemnisé si les bruits provenant d'un chantier proche persistent à l'intérieur du bâtiment malgré la fermeture des fenêtres (C.A. de Paris, 12 janv. 1999, Mutuelle du Mans Assurances Iard c. Voillot, *préc.*).

Il en va de même pour un hôtelier qui, pendant la période estivale, dans une station balnéaire, subit les gênes sonores occasionnées par un chantier se situant à proximité de l'établissement entraînant des plaintes de sa clientèle.

La réparation du préjudice subi par le propriétaire est de 50 000 F (7 600 euros) au titre de dommages et intérêts (C.A. de Caen, 1er juin 1995, Coin c. S.C.I. Piazza, *préc.*).

Même cas de figure pour les responsables d'une école située à proximité d'un chantier lorsque les professeurs sont obligés de faire un effort anormal de diction et qu'est constaté un relâchement des élèves (C.A. de Paris, 25 avril 1980, Cie La mondiale c. G.I.E. Institut Supérieur de Gestion, *Juris-Data* n° 095303).

2-4-3-2 Éléments à décharge retenus :

La jurisprudence ne retient pas toutes les gênes occasionnées par les chantiers comme des troubles excédant les obligations normales du voisinage.

En effet, peut être rejetée la demande d'indemnisation en fonction :

- du fait que **les troubles étaient inévitables**. Ne peuvent prétendre à indemnisation, les tiers qui ont subi des troubles, du fait de la proximité d'un chantier nécessaire à la démolition de l'immeuble voisin (C.A. de Besançon, 20 janv. 1987, Syndicat des copropriétaires c. Strachhi, *Juris-Data* n° 040740) ;

- **du lieu**. La présence d'un chantier de construction ne peut pas être constitutive de troubles excédant les inconvénients normaux de voisinage, dès lors que les troubles ne dépassent pas les bruits entendus en ville à la suite de travaux sur les chaussées et trottoirs (C.A. de Paris, 27 janv. 1989, S.C.I. du 12, rue de l'Abbé-de-l'Épée c. Maret, *Juris-Data* n° 024657) ;

- du fait également que, lors de la construction d'immeubles collectifs en zones urbaines, les troubles occasionnés ne sont pas supérieurs à ceux qui peuvent affecter tout propriétaire qui se

trouve normalement exposé au risque de voir les immeubles collectifs édifiés sur les parcelles voisines (C.A.A. de Paris, 12 sept.1996, Rubin, n° 93PA00499).

●de la personne. Une personne morale n'est pas recevable à demander la réparation de troubles de voisinage, ces derniers ne pouvant être perçus et ressentis que par des personnes physiques (C.A. de Paris, 12 avril 1991, Syndicat des copropriétaires 14, rue de l' Abbé-de-l'Épée à Paris 5ème c. S.C.I. du 12, rue de l' Abbé-de-l'Épée, *Juris-Data*, n° 021113).

Conclusions :

Pour ce qui concerne la protection du voisinage contre les nuisances sonores ou vibratoires, aucun texte de loi ou réglementaire définissant des seuils à respecter n'existe actuellement.

Se retourner vers des études reprises dans différentes normes peut servir de point de repère. Cependant, il a été vu que suivant les pays, les critères et paramètres retenus dans ces textes diffèrent entre eux ce qui a tendance à rendre difficile la définition de la norme à retenir lors d'une étude d'impact préventive.

Par rapport à la gêne que peuvent produire les chantiers sur l'environnement, si l'on se retourne vers la jurisprudence, la ligne directrice prise s'appuie sur le principe que les travaux sont créateurs de nuisances mais sont nécessaires pour la collectivité. Ceci explique pourquoi les maîtres d'ouvrage ne sont pas systématiquement condamnés.

En revanche, ce sont les excès qui sont répréhensibles surtout lorsqu'un chantier ne tient pas compte du contexte dans lequel il s'inscrit et qu'aucune mesure n'est prise pour en diminuer les risques de gênes.

●Fort de ce constat, c'est dans cette optique que vont être développées les parties suivantes qui vont notamment s'intéresser à l'aspect prévisionnel des nuisances que ce soit dans le domaine acoustique ou vibratoire qu'il est possible de mettre en place pour en réduire l'impact sur le voisinage proche. Mais avant toutes prévisions, il est nécessaire de s'intéresser aux futures étapes d'un chantier pour se familiariser avec les différentes sources de nuisances susceptibles d'être rencontrées lors de cette évaluation.

Analyse d'un chantier

Un chantier, comme tout secteur professionnel, possède ses spécificités. Pour mieux apprivoiser ce milieu particulier, les multiples étapes d'un chantier vont être décrites afin de connaître les différentes sources de nuisances potentielles qu'il sera possible de rencontrer sur ce genre de site en activité.

Principales étapes d'un chantier :

Un chantier peut se définir en deux périodes principales :

- le gros œuvre
- le second œuvre

Le gros œuvre est une phase du chantier correspondant à l'élévation du bâtiment qui va des fondations à la toiture. Il peut se résumer en trois grandes étapes :

- La démolition
- Le terrassement et fondations
- Elévation du bâtiment en construction (charpentes, mur en brique ou voile béton, toiture etc...)

Le second œuvre est l'aménagement intérieur du bâtiment. Il correspond aux travaux d'électricité, de plomberie, mise en place des revêtements de sol, la peinture etc....

A ce stade des travaux, les fenêtres du bâtiment sont posées. Il suffira donc de s'assurer que pendant les travaux les plus bruyants (perceuses, coup de marteaux), les fenêtres restent bien fermées pour diminuer la propagation du bruit sur l'extérieur.

En revanche, le gros œuvre reste la partie importante à prendre en compte pour la gestion des nuisances sonores et vibratoires. Chacune des phases qui le compose fait appel à des techniques particulières qui vont être succinctement développées dans ce qui suit afin de mieux connaître les différentes sources de bruit ou de vibration qu'il est possible de rencontrer tout au long du chantier.

Le Gros Œuvre

3-1- La démolition :

Le choix d'une technique de démolition dépend de nombreux critères tels que :

- la localisation du site
- restrictions sur le bruit, les poussières, vibrations, émanations etc...

- Epaisseur de démolition
- Qualité du béton.

Deux grands types de démolitions : Démolition à l'explosif
Démolition mécanique

3-1-1 Démolition à l'explosif :

La difficulté des démolitions à l'explosif diminue lorsque celle des démantèlements mécaniques augmente. Elle n'offre un danger qu'à la minute du tir contrairement aux techniques mécaniques dont le risque perdure pendant toute la durée de leur activité.

Elle est souvent utilisée pour :

- les édifices supérieurs à 20 mètres de hauteur
- les cheminées de grande hauteur
- les constructions industrielles.

Les principaux éléments à prendre en compte pour la protection du voisinage sont :

- l'onde de choc
- le bruit
- les vibrations solidiennes

L'onde de choc :

L'unité de mesure d'une onde de choc est la pression calculée en kilo Pascal (kPa).

La pression P_s pouvant être atteinte peut se calculer en fonction de la charge d'explosif unitaire Q en kg et de la distance d du point de mesure, par la formule suivante (Géophysique GPR International Inc. (Québec), 2008) :

$$P_s = K \left(\frac{d}{Q^{\frac{1}{3}}} \right)^{\beta} \quad \text{Eq (3.1)}$$

Avec :

P_s : surpression d'air en Pascals

K et β : constantes de dynamitage

d : distance en mètre

Q : charge unitaire de dynamite en kg

Cette formule provient de recherche sur le dynamitage en milieu minier. Les constantes K et β d'un lieu sont déduites de plusieurs essais (30 essais minimums pour une bonne représentation statistique) sur site en mesurant la pression P_s et en connaissant la distance d ainsi que la charge Q .

Pour un site de démolition d'immeuble, les constantes K et β ont été définies comme suit par la formule CEBTP-(Centre d'Etude et d'Essai du Bâtiment et des Travaux Publics) Cemex (BENZAÏT, 1997) :

$$P_s = 46,3 \left(\frac{d}{Q^{\frac{1}{3}}} \right)^{-1,2} \quad \text{Eq (3.2)}$$

avec : P_s en kPa

d en mètre

Q charges unitaires de dynamite en kg

A titre d'information, quelques niveaux de pressions et leurs conséquences :

$P_s = 14\text{kPa}$: toutes les vitres se cassent

$P_s = 5\text{kPa}$: quelques panneaux de vitres mal montés se brisent

$P_s = 1\text{kPa}$: les panneaux de vitres précontraints ou mal montés se cassent

$P_s = 0,2\text{kPa}$: les vitres et les assiettes vibrent.

La démolition à l'explosif est réglementée que ce soit au niveau des autorisations et déclarations administratives qu'au niveau des compétences techniques. Elle ne peut être exercée que par des sociétés spécialisées. Ce domaine de la protection du voisinage contre les risques de dégradations des édifices alentours est du ressort de l'entreprise habilitée pour cette phase du chantier et il n'est donc pas du domaine de compétences de l'acousticien.

La circulaire de 1996 du Ministère de l'Environnement recommande de limiter la surpression aérienne à 125 dB (BLANCHIER et SAUVAGE, 2004).

Le Bruit :

Le bruit est important et mal ressenti pour les personnes situées sur un rayon de 150 mètres si celles-ci sont surprises par l'explosion. Il sera donc nécessaire d'informer le voisinage plusieurs jours avant la date prévue de la démolition. Le jour J, pour la sécurité du personnel de chantier et afin également de prévenir le voisinage, il est réalisé une diffusion par haut-parleur du décompte du tir.

Pour les habitations situées à moins de 50 mètres, le bruit est assimilable à la déflagration ressentie par un tireur lors de l'utilisation de son fusil.

Dans la littérature, le niveau sonore à **10 mètres** d'une déflagration d'un fusil peut être estimé aux alentours de **124 dB(A)** (moyenne arithmétique des mesures réalisées sur un champ de tir sur différentes armes à feu). Pour l'estimation du niveau sonore à une distance d du logement du riverain, la correction du niveau sonore pourra se recalculer en se rapportant à une atténuation due à la distance par l'Eq (1.1) retranscrite en dB(A) :

$$L_i(d=10) = 124 \text{ dB (A)}$$

$$L_i(d) = 144 \text{ dB (A)} - 20\text{Log}_{10}(d)$$

Eq (3.3)

Les vibrations solidiennes :

La vitesse particulaire des vibrations solidiennes transmises par le sol, peuvent être estimées par la formule de Chapot suivante (Géophysique GPR International Inc. (Québec), 2008):

$$V = K \left(\frac{d}{Q^{\frac{1}{2}}} \right)^{\beta}$$

Eq (3.4)

V : vitesse particulaire en mm.s^{-1}

K : coefficient de dynamitage caractérisant le sol à traverser et le type de tir pratiqué

β : coefficient caractérisant l'atténuation des ondes vibratoires

d : distance en mètre

Q : charge unitaire de dynamite en kg

Cette équation ressemble étrangement à l'Eq (3.1), mais il s'agit ici de vitesse particulaire et non de pression. Même si dans l'équation des ondes dans un même espace libre aérien, il existe une relation entre la vitesse particulaire et la pression, elle ne peut être appliquée ici puisqu'il s'agit de deux milieux de propagation différents, la pression de l'onde de choc dans un gaz (l'atmosphère) et les vibrations solidiennes dans un solide (le sol). Cette équation de modélisation a été découverte de manière empirique après une multitude d'expériences et d'essais.

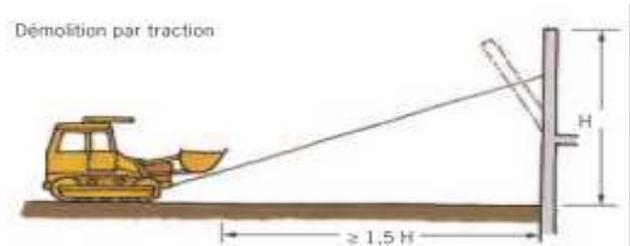
A ce titre, le paramètre β a été estimé à une valeur de - 1,8 pour la destruction de bâtiment du génie civil (BLANCHIER et SAUVAGE, 2004). Pour la valeur K, elle ne peut être déduite qu'après étude géotechnique.

Cependant, il a été estimé qu'à une distance de **20 mètres**, suivant la technique de démolition utilisée, la vitesse vibratoire est comprise entre **10 et 30 mm/s**. Cette différence de niveau dépend d'une part de la puissance de la charge Q ainsi que de la nature du sol dans lequel va se propager la vibration.

3-1-2 Démolition mécanique :

Plusieurs procédés mécaniques sont applicables pour la démolition d'édifice (CORMON, 1985 ; MILLERON, 2009) :

La démolition par traction : il consiste à faire passer un câble autour de la partie d'ouvrage à démolir puis à tirer sur ce câble à l'aide d'engin pour aboutir à l'écrasement. Elle est particulièrement bien adaptée pour les ouvrages en maçonnerie plutôt qu'en béton armé.



La démolition par poussée : On utilise le godet d'un engin du type pelle mécanique pour démanteler des parties d'ouvrage dont la résistance à la traction est faible. Cette technique est donc également conseillée pour les ouvrages en maçonnerie



Démolition par chocs répétés : Les marteaux-piqueurs et les marteaux perforateurs sont des appareils pneumatiques hydrauliques, électriques et plus rarement à moteur thermiques qui agissent par percussion (1 200 à 2 200 coups/ minutes) ou par percussion et rotation pour briser ou forer des roches ou du béton.

Ils sont classés suivant leur poids qui détermine leur puissance de frappe :

- Marteaux-piqueur léger : $m < 8 \text{ kg}$
- Marteau-piqueur moyens : $8 \text{ kg} < m < 18 \text{ kg}$
- Brise-béton : $18 \text{ kg} < m < 40 \text{ kg}$
- Brise roche monté sur bras de pelles hydraulique : $100 \text{ kg} < m$

Le choix de l'appareil sera déterminé suivant la dureté du matériau et de l'épaisseur des éléments à démolir. La règle applicable dans ce domaine est la durée de l'utilisation pour chaque action pour briser le matériau. Par exemple, si la durée est comprise entre 0 et 10 seconde, un appareil de masse moyenne ou légère sera correct. En revanche, si la durée est comprise entre 20 et 30 secondes, un appareil plus lourd sera mieux adapté pour une meilleure efficacité.

L'arrêté du 2 janvier 1986 réglemente les niveaux maxima de puissance acoustique de ce type d'appareils sur le marché français qui sont les suivant :

Tableau XII Niveau de puissance acoustique maximale d'un marteau-piqueur ou brise roche suivant son poids.

Masse m du marteau-piqueur ou du brise-béton (en kg)	Niveau de puissance acoustique maximale L_{wA} (en dB(A) – Ref : $W_0=1pW$)
$m < 20$	108
$20 \leq m \leq 35$	111
$35 < m$	114

Ces outils sont tous très bruyants et les vibrations commencent à être conséquentes pour les brise-bétons et les brise-roches. Les coûts de démolitions s'échelonnent, à la date de rédaction du présent mémoire, entre 40 euros/m² pour le brise-roche à 150 Euros / m² pour le marteaux-piqueur léger.

La démolition par découpage :

Différents procédés existent qui sont particulièrement bien adaptés pour la découpe du béton armé.

Le câble diamanté : il va utiliser les qualités d'abrasion du diamant pour découper le béton ainsi que ses armatures en fer. Les rendements sont compris entre 200 et 700 cm² / min selon la dureté du matériau sciée.

La lance thermique à acétylène : en chauffant l'acier contenu dans le béton à des températures avoisinant les 900 ° C, il va se consumer en présence d'oxygène. Cette réaction d'oxydation va faire monter la température jusqu'à environ 3 500 °C qui va changer la structure du béton de son état solide à un état liquide (le laitier).

La lance à jet de flamme qui utilise le même principe que la lance thermique mais le comburant n'est plus de l'acétylène mais du kérosène. La flamme produite est accélérée à une vitesse de 1 500 m.s⁻¹. Cette méthode est plus rapide que la lance thermique mais elle est également beaucoup plus bruyante.

La lance à plasma est une technique qui utilise l'électricité pour produire, entre deux électrodes, un arc électrique qui va entretenir la combustion d'une poudre métallique placée entre ces deux mêmes électrodes et permettre d'atteindre une température permettant la découpe du béton ainsi que de ses armatures.

Le jet d'eau sous haute pression : l'action d'un jet puissant d'eau pure ou additionnée de sable de quartz va permettre la découpe du béton. Les pressions doivent être comprises entre 600 et 1000 bar (1 bar = 10^5 Pascals).

La démolition par broyage : Elle consiste à broyer des ouvrages en béton à l'aide de vérins hydrauliques. Le « wall-cracker » ressemble à une grosse pince munie de 6 vérins à sa base. Elle permet de démolir des murs jusqu'à 95 cm d'épaisseur. Le rendement est estimé à 2 à 5 m³/h. Le « Pile-Cracker » est de forme circulaire composé de 8 vérins. Il est spécialisé pour la démolition des poteaux ou des pieux de fondation de diamètre allant jusqu'à 120 cm.

La démolition par éclatement :

Plusieurs méthodes existent.

Générateurs de micro-ondes : On utilise des ondes électromagnétiques dont les fréquences sont comprises entre un et quelques GHz. Ce rayonnement micro-onde va agiter les molécules d'eau du matériau qui vont se transformer en vapeur qui va créer une pression interne et fragmenter le béton.

Méthode électrique : On fait passer un courant électrique dans les armatures du béton qui s'échauffent et prennent en volume et font éclater le béton.

Utilisation d'agents expansifs : Le mur est perforé. Dans ces trous est introduit une substance une sorte de mortier qui va, au fil du temps, prendre du volume et faire éclater le béton. Des contraintes de 30 à 100 MPa sont atteignables. L'avantage est que c'est un procédé moyennement bruyant (forage des trous), mais pas très rapide puisque une attente de 48 heures est nécessaire.

3-2 Le Terrassement et les fondations

3-2-1 Le terrassement

Par définition, le terrassement est l'action de creuser et de transporter de la terre. Sur un chantier, cela comprend le creusement du sol pour recevoir les fondations d'un édifice ou celui de tranchées pour les réseaux souterrains (assainissement, gaz, électricité etc...), ou le comblement par remblais pour aplanir une surface ou créer un talus.

Le terrassement est un cycle qui peut se résumer en 4 mouvements :

- La fouille : opération consistant en l'extraction de déblais par l'intermédiaire de pelles hydrauliques, de boteurs-ripper.

- La charge : mise en charge des déblais par l'utilisation de chargeur qui déplacent les déblais dans des véhicules de transports du type tombereau
- Le transport
- La mise en décharge sur un site de stockage (mise en dépôt) en vue d'une utilisation future si besoin est.

Les matériels utilisés pour ce type de travaux et qui seront sources de bruits sont les suivants :



Pelle hydraulique Terrassement / Chargement

Estimation puissance acoustique L_{wA} : entre 100 et 112dB(A)



Bouteur Ripper : Défonçage du sol / Poussage des terres / Nivellement

Estimation puissance acoustique L_{wA} : entre 107 et 110dB(A)



Chargeur : Terrassement / Chargement

Estimation puissance acoustique L_{wA} : entre 105 et 109dB(A)



Compacteur : Compactage



Nivelleuse Nivellement

Réglage des pentes

Estimation puissance acoustique L_{wA} : autour de 110dB(A)



Tombereau Chargement

Transport

Déchargement

Estimation puissance acoustique L_{wA} : autour de 109 dB(A)

La rapidité d'exécution du terrassement ne dépend pas uniquement de la superficie du site à entreprendre mais également du service de déblaiement.

La durée du cycle de chargement et de déchargement entre le lieu de terrassement et celui où seront entreposés les déblais, peut-être plus ou moins long suivant les facteurs suivants :

- L'accessibilité du chantier avec ses rampes d'entrées et sorties des tombereaux ;
- La distance à parcourir entre les deux sites.

Ainsi, même si la superficie du terrain à terrasser permettrait de mettre plusieurs pelleteuses en activité simultanément sur le chantier, si le cycle de déblaiement est trop long, cette

solution, pour gagner en rapidité d'exécution, ne pourra être retenue car non rentable en terme d'utilisation de temps de travail des compagnons sur le chantier.

Les rampes d'accès sur un site sont donc très importantes dans l'organisation d'un chantier. Elles peuvent, si elles sont mal étudiées, engendrer une augmentation de la durée de certaines phases de travail et notamment celle du terrassement qui n'est pas la période d'activité la moins bruyante.

Par ailleurs, il faut également tenir compte des **alarmes de recul** ($L_{WA} = 98$ à 108 dB(A)) qu'il y a sur les engins de chantier et notamment sur les tombereaux. Le choix de leur trajet devra intégrer un espace permettant des demi-tours et éviter le plus possible de les obliger à réaliser des marches arrières qui entraînent un déclenchement des alarmes.

Par ailleurs, s'il est question de réaliser un terrassement en vue de fondations pour un nouvel édifice, une étude géologique du terrain est nécessaire. La nature du sol, sa composition, sa teneur en eau, déterminerons le choix du type de fondation à entreprendre pour la stabilité du futur immeuble.

3-2-2 Les fondations :

Les fondations jouent le rôle d'interface entre l'ouvrage et le sol afin de lui assurer une assise stable et pérenne.

Elles dépendent du type de l'ouvrage à savoir sa géométrie et sa répartition des masses, ainsi que de la nature du sol. Ce bref aperçu, loin d'être exhaustif, n'a d'autre but que de se familiariser avec les différentes techniques de fondation rencontrée sur un chantier.

3-2-2-1 Les fondations superficielles

Les fondations superficielles sont mises en œuvre lorsque la construction peut prendre appui sur une couche de terrain de résistance acceptable, à faible profondeur par rapport au niveau le plus bas de la construction (sous-sol) et non du terrain naturel.

Ce type de fondation est constitué d'une semelle en béton

Les plus communes se résument en trois types:

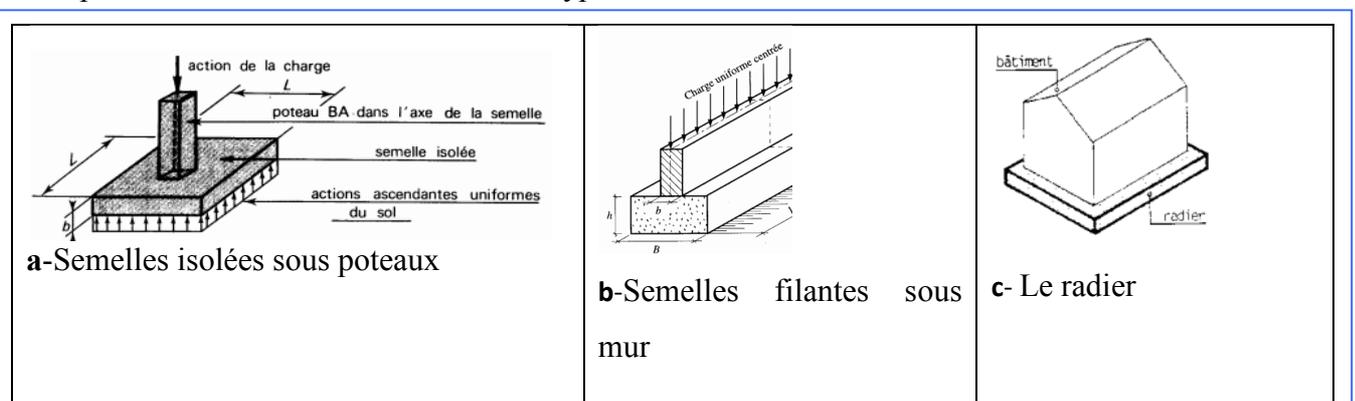


Figure 8 : Différents type de semelles pour des fondations superficielles.

Sources de bruit:

Battage ou vibrofonçage de palplanches, grues, centrale à béton, aiguille vibrante pour le béton, scies et meuleuse (ferraillage du béton)

Mais avant de pouvoir couler le béton dans l'espace réalisé par le terrassement, il est parfois nécessaire de mettre en place des **palplanches**, sorte de grandes plaques d'acier, que l'on enfonce tout autour du périmètre de la futur fondation, afin de retenir la terre pendant le coulage du béton. Leur mise en place se fait soit par battage soit par vibrofonçage, techniques utilisées également pour l'installation des pieux pour les fondations profondes et qui vont être succinctement décrites ci-dessous.

Source de vibrations :

Battage ou vibrofonçage des palplanches.

3-2-2-2 Les Fondations profondes :

Lorsque le sol en surface ne peut supporter les charges appliquées, on utilise des fondations profondes qui permettent de transmettre les contraintes à des couches de sol plus résistantes par l'intermédiaire de pieux en béton. Ces derniers seront soit préfabriqués et donc importés sur le site, soit coulés sur place directement dans le conduit percé dans le sol.

Les techniques de fonçage des pieux dans le sol sont au nombre de quatre :

- Le battage
- Le vibrofonçage
- Le forage
- Le vérin hydraulique

▼ Le battage :

Le principe du battage d'un pieu est d'enfoncer le pieu dans le sol en laissant tomber une masse lourde à son extrémité supérieure.

Cette technique est retenue pour des sols meubles du type vases ou tourbes, ou des sols constitués de sables grossiers à gros grains ou à graviers mais sans inclusions rocheuses. Elle est également bien adaptée pour des sols humides ou complètement saturés. En revanche, pour des sols secs, la pénétration du pieu est plus difficile.

Le système est constitué principalement de deux éléments : -

-Un système de guidage composé :

- D'une sonnette qui constitue l'engin le plus classique qui assure le guidage du pieu et du mouton
- D'un mât de battage généralement fixé en deux points sur grue à chenilles
- D'un mât suspendu, appelé également jumelle pendante, qui est un

équipement très léger et très mobile qui s'appuie sur le pieu à battre et il sert à guider le mouton uniquement.

-un mouton qui, pour le battage, est une masse qui vient frapper l'élément à enfoncer.



Niveaux de puissance acoustique :

D'après une étude acoustique (ROCHER-LACOSTE, 2008), les puissances acoustiques L_{WA} relevées lors de différents battages sont comprises entre **128 et 130 dB(A)**.

Figure 9 : Battage d'un pieu (ROCHER-LACOSTE, 2008).

▼ Le vibrofonçage :

La technique du vibrofonçage consiste à utiliser un vibreur pour appliquer une force vibratoire en tête du pieu pour assurer son enfoncement. Le principe est de déstructurer temporairement le sol au contact du pieu et de faire ainsi diminuer les forces de frottement qui s'oppose à la pénétration.

Cette technique utilise un système de guidage comme pour le battage, mais le mouton n'est plus une masse mais un vibreur. Ce dernier transmet une vibration longitudinale au pieu qui va s'enfoncer graduellement dans le sol.

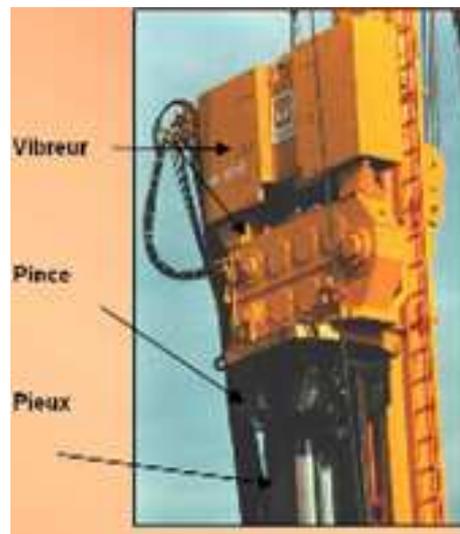
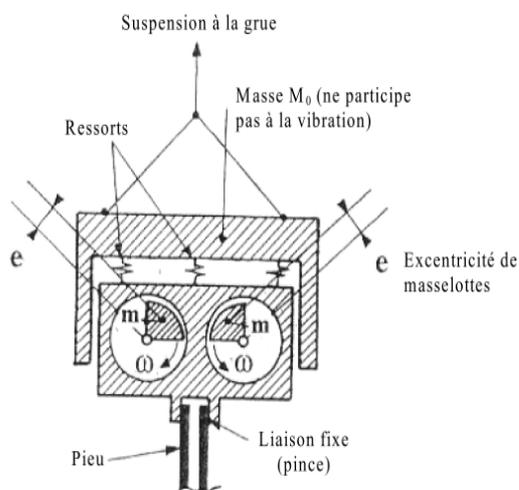


Figure 10 : Principe mécanique du vibreur (AKLE, 2006).

Le système est constitué de deux parties principales : le vibreur et le groupe énergétique qui peut être soit hydraulique soit électrique.

Cette technique est plutôt utilisée pour des sols composés de sables à grains arrondis et de graviers, des sols plutôt mous, humides ou complètement saturés.

Niveaux de puissance acoustique :

D'après cette même étude acoustique (ROCHER-LACOSTE, 2008), les puissances acoustiques **L_{WA}** lors de différents vibrofonçages sont comprises entre **108** et **126 dB(A)**, soit un différentiel de 18 dB(A) entre ces deux extrêmes. Cette dispersion des résultats peut s'expliquer par les différents éléments mécaniques constituant le système. Si l'on prend par exemple le matériau composant l'appareillage du guidage du pieu, s'il est en acier ou en bois, il rayonnera plus ou moins fort lors du fonctionnement du vibreur. Agir sur la nature de cet élément peut donc contribuer à faire baisser considérablement le niveau sonore global de cet engin lors de sa mise en activité.

Niveaux vibratoires produits par ces deux techniques de fonçage de pieux :

Les différents types d'ondes rencontrés (Voir annexe 1) vont se retrouver répartis de la manière suivante (voir figure 11). Pendant la période d'enfoncement du pieu, une première partie (1) de l'énergie est transformée en ondes de surfaces au point de rencontre du haut du pieu et du sol. Une seconde partie (2) s'achemine le long du fût et se change en ondes de cisaillement S polarisées verticalement, et se propage vers l'extérieur avec un front d'onde quasi-cylindrique. Une troisième partie (3) de l'énergie se retrouve à la pointe du pieu créant des ondes de compression P et également de cisaillement S qui vont se transmettre dans le sol sous forme d'ondes sphériques. Enfin, une quatrième partie (4) va remonter le long du tube par réflexion sur son extrémité.

Quand les ondes P et S arrivent à la surface du sol, une partie de cette énergie est transformée en ondes de surface R (ondes de Rayleigh) et une seconde partie est réfléchiée vers les profondeurs du sol.

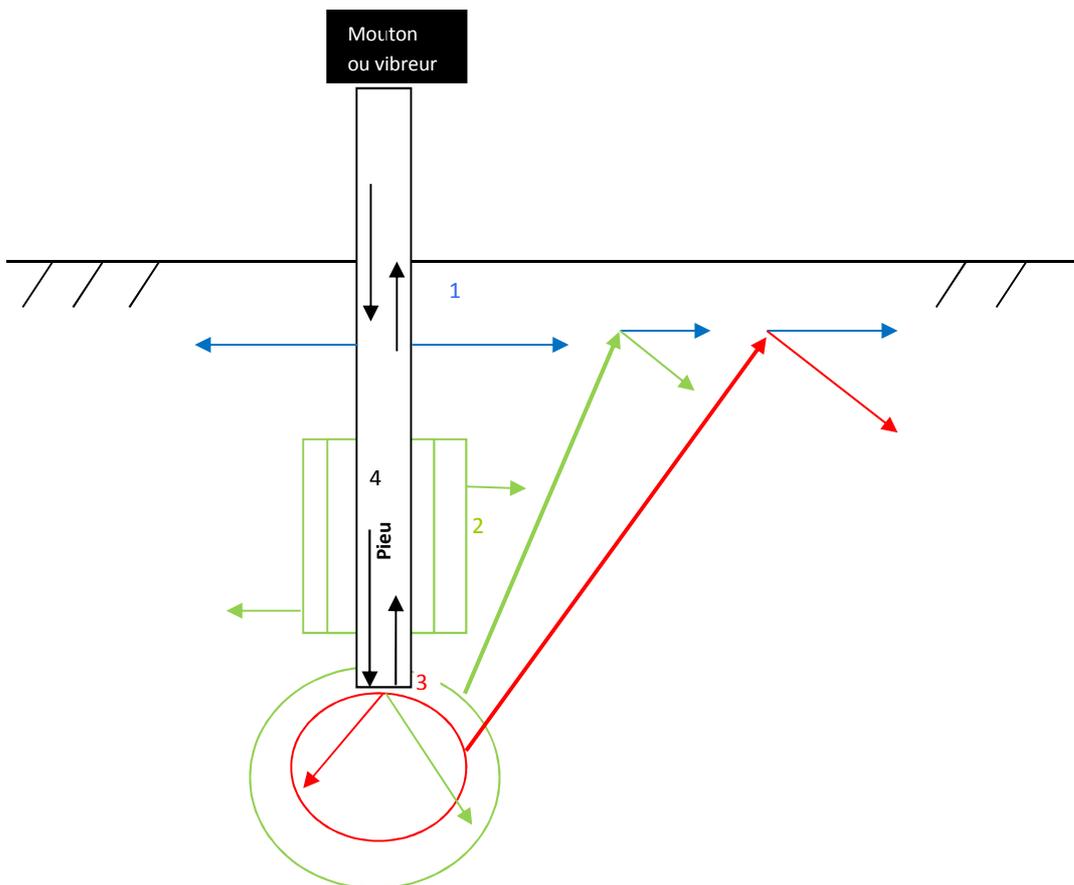


Figure 11 : Mécanisme de génération d'onde de surface **R**, de cisaillement **S** et de compression **P** par battage ou vibrofonçage de pieux dans un sol homogène (AL ABDEH, 2005).

La différence entre les deux techniques est le pourcentage de répartitions des différents types d'ondes. Par ailleurs, pour connaître l'impact de ces vibrations sur l'environnement, il existe plusieurs approches différentes pour modéliser et prévoir leurs vitesses vibratoires. Elles seront passées en revue lorsqu'il sera question de méthodes générales de prédiction de niveaux vibratoires sur site qui seront développées ultérieurement (Voir annexe 4).

▼ Le forage



Figure 12 : Foreuse en activité.

Le forage est adapté pour pratiquement tous les terrains notamment pour les sols secs et cohérents.

Le système est constitué d'une tête de rotation mue par un moteur hydraulique.

Il existe plusieurs techniques de forage pour l'installation d'un pieu suivant la nature du

terrain. S'il est cohérent (*), le pieu pourra être coulé directement après le retrait de la tarière.

Dans le cas contraire, lorsque le forage est arrivé au niveau de profondeur souhaité, le béton est injecté directement par l'extrémité de la tarière.

Lors de la remontée de la tarière, elle charrie le volume de terre qui va être remplacé par le coulage de béton. Une fois le béton mis en place, une colonne ferrillée y est insérée afin d'armer le béton pour le rendre plus solide

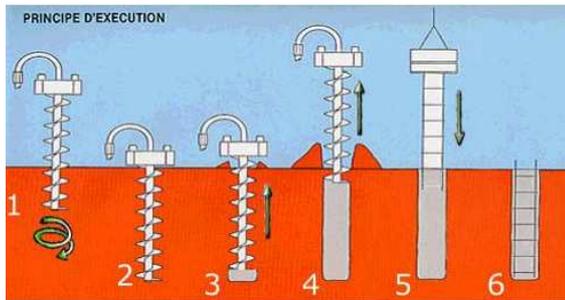


Figure 13 : Technique de coulage d'un pieu en béton par forage dans un sol non cohérent.

(*) Un sol est dit cohérent lorsque les grains de matière qui le compose sont aptes à rester liés les uns aux autres. L'argile est un sol cohérent. En revanche, le sable n'est pas un sol cohérent mais pulvérulent

Niveaux de puissance acoustique :

La puissance acoustique produite par ce procédé dépend de la puissance motrice du moteur hydraulique installé ainsi que de la nature du sol. Plus le sol sera dur, plus la puissance du moteur sera sollicitée, et plus il y aura un risque de niveau sonore accru. A titre d'information, la puissance mécanique (et non acoustique) du moteur peut être comprise entre 70 et 125kW suivant les différents modèles consultés.

Niveaux vibratoires :

Au niveau vibratoire cette technique est celle qui en produit le moins après le vérin hydraulique, par comparaison aux pieux battus ou vibrés.

▼ Le vérin hydraulique :

Celle qui produira le moins de vibrations est la méthode avec vérin hydraulique. Cependant cette méthode n'est pas sans inconvénient. En effet, pour son fonctionnement, il faut que la presse soit posée sur un massif de réaction, généralement quelques palplanches qui ont dû être mises en place par battage. Une fois cette base installée, la presse va ensuite se déplacer de palplanche en palplanche en s'appuyant sur les dernières pour enfoncer la nouvelle.

L'avantage est que la mise en place ne réclame que le battage de quelques palplanches (trois ou quatre), donc une durée d'exposition au bruit et aux vibrations relativement courte pour ensuite permettre la mise en place des autres palplanches sans impacts.

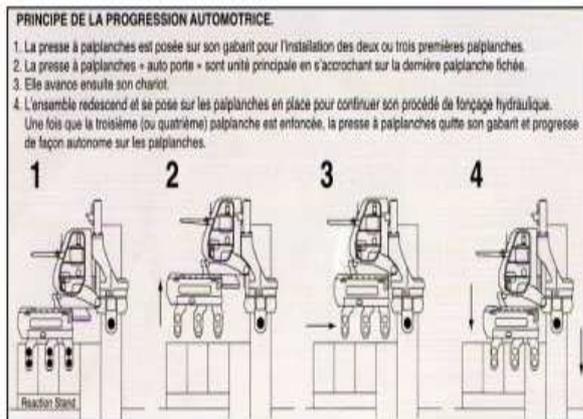


Figure 14 : Principe de fonctionnement du vérin hydraulique pour l'enfoncement de palplanches.

Sources sonores : Battage des premières palplanches (au mouton pneumatique $125 \text{ dB(A)} \leq L_{WA} \leq 138 \text{ dB(A)}$; au mouton diesel $127 \text{ dB(A)} \leq L_{WA} \leq 132 \text{ dB(A)}$), et les groupes compresseurs.

Sources vibratoires : battage des premières palplanches.

3-3 Elévation du Bâtiment

Suivant la nature du bâtiment, à la suite des fondations, vient la création des murs, appelés voiles béton, des planchers, appelés dalles béton, de la charpente et du toit.

-Elévation des murs et pose des planchers

Les murs bétons se montent à l'aide d'un coffrage composé de deux banches métalliques.



Figure 15 : Paire de banches entre lesquelles va être coulé le béton.

Les différentes étapes de fabrication du voile peuvent se résumer ainsi :

- Mise en place des banches avec raccordement à éclisses ;
- installation des armatures acier pour armer le béton ;

- coulage du béton ;
- vibrage du béton afin d'enlever les bulles d'air et le rendre plus compact ;
- démontage des banches.

Les vibrations dans le béton se font à l'aide d'un vibreur appelé aiguille, qui possède généralement deux modes de vibrations suivant la nature des granulats composant le béton : une fréquence basse (environ 160 Hz) pour de gros granulats et une fréquence double pour des éléments plus fins.

Sources de bruit:

Essentiellement le bruit provient de :

-La mise en place des éclisses à l'aide de coups de marteau

($111 \text{ dB(A)} \leq L_{wA} \leq 120 \text{ dB(A)}$)

-des vibrations des banches lorsque l'aiguille les touche

($101 \text{ dB(A)} \leq L_{wA} \leq 111 \text{ dB(A)}$)

-de la centrale à béton à proximité pour le coulage ($101 \text{ dB(A)} \leq L_{wA} \leq 114 \text{ dB(A)}$)

Pour les planchers, la même technique pour le bétonnage est utilisée mais avec la mise en place des banches à l'horizontale, supportées par des étais en acier. Une nouvelle source de bruit potentielle est l'utilisation de marteaux pour bloquer le serrage des étais.

-Elévation des charpentes



Pour certains édifices, le choix d'une charpente métallique a l'avantage de réduire les charges transmises au sol par comparaison avec des éléments porteurs en béton.

Entre l'ossature de la charpente, sont installés des matériaux isolants thermiques et acoustiques pour respecter les normes

actuellement en vigueur dans le bâtiment. Cette technique est utilisée dans des constructions telles que salles de sports, piscines, entrepôts, usines. Ce type d'ossature peut également se retrouver en toiture de certains immeubles.

Source de bruit: Bruits d'impact de marteaux ainsi que l'entrechoquement des éléments métalliques entre eux lors de leur manipulation ($120 \text{ dB(A)} \leq L_{wA} \leq 133 \text{ dB(A)}$).

Source de vibration : non significatives.

Conclusions :

La démolition reste une activité particulièrement bruyante. Par ordre décroissant, la plus forte en niveaux par rapport à une mesure acoustique et vibratoire à une distance donnée, reste l'utilisation de la méthode par explosifs et la moins génératrice de nuisances celle utilisant la méthode par éclatement. Cependant, la résistance du matériau à démolir ainsi que la configuration des lieux et notamment du voisinage proche, est à prendre en compte pour le choix de la méthode la mieux adaptée en termes d'efficacité, de rapidité et de niveaux sonores et vibratoires engendrés. Il peut parfois être opportun de choisir une méthode entraînant des nuisances plus importantes mais d'exécution plus rapide ce qui impactera l'environnement sur une durée plus courte. Cependant le point important également à prendre en compte est la protection des bâtiments contre les vibrations solidiennes. Il faut s'assurer qu'elles n'entraîneront aucune fragilisation des fondations ou des murs des bâtiments avoisinants ni de problèmes sur leur contenu matériel (équipements informatiques ou de laboratoire).

● Connaissant les différentes phases d'un chantier et les différentes techniques de travaux qu'il est possible de rencontrer sur un site, il va être maintenant question dans cette 4^{ème} partie qui va suivre, de s'intéresser aux différentes manières de prendre en compte les nuisances sonores ou/et vibratoire que cette activité peut engendrer.

Prise en compte des nuisances sonores et vibratoires dans un projet de chantier

Un chantier qui ne soit pas source de bruit ou de vibration n'existe pas. La réalité est tout autre. Face à ce constat, la meilleure des solutions est d'essayer de s'en préserver au mieux. Il va donc être passé en revue les différentes techniques d'isolation qu'il sera possible de mettre en place afin de diminuer les nuisances des futurs travaux envers le voisinage.

Concernant les techniques prévisionnelles des bruits de chantier, une méthode sera développée en annexe 3.

Principes d'isolation pour réduire les niveaux sonores et vibratoires d'un chantier

Les méthodes prévisionnelles présentées, que ce soit dans le domaine acoustique ou vibratoire, peuvent conclure à des niveaux considérés trop importants par rapport au voisinage proche. Il faudra donc, dans le cadre préventif, chercher et trouver des solutions d'isolation avant le début du chantier.

Pour diminuer l'incidence d'une source sonore ou vibratoire par rapport à un lieu à protéger, il y a trois modes opératoires classiques possibles d'action suivant les cas rencontrés :

- agir sur la source ;
- agir sur le chemin de propagation entre la source et le récepteur;
- agir sur le lieu de réception.

Dans le cadre des ondes aériennes et vibratoires, il va être développé, respectivement, ces trois modes d'action préventifs.

4-1- Isolation acoustique

4-1-1 Actions sur la source sonore :

La première action réside dans le choix des engins de chantier les mieux adaptés aux tâches qui leur seront imposées. Avec la nouvelle réglementation européenne (§2-3-1), il est possible

de connaître leur niveau de puissance acoustique pondérée A. Cette donnée permettra de procéder à une sélection judicieuse du matériel afin de retenir des modèles qui seront les moins bruyants possible et de participer ainsi à la baisse du niveau sonore global pratiqué sur le chantier.

Il est conseillé, par exemple, d'utiliser les marteaux piqueurs électriques plutôt que ceux avec moteur compresseur qui sont des sources de nuisances nettement plus importantes.

Pour le fonçage de pieux, il vaut mieux utiliser, quand le terrain le permet, par ordre croissant de bruit, la technique du forage, la technique du vérin hydraulique (enfoncement des pieux par poussée graduelle), le vibrofonçage et enfin le battage de pieux qui est la plus bruyante.

Si cette dernière technique est inévitable, *une seconde action* est possible. Elle consiste à améliorer l'isolation acoustique de l'engin.

Pour le battage de pieux, en installant une sorte de jupe acoustique autour du conduit-guide emprunté par le mouton, il est possible d'atteindre une atténuation de **20 dB(A)** (correspondant à une sensation d'un niveau sonore 4 fois moins élevé).



Figure 16 : Mise en place d'une jupe acoustique sur le mât de battage.

Le même type de traitement peut être appliqué pour les brise-roches, ou cette fois-ci c'est le marteau qui est traité soit par une toile acoustique soit par la mise en place d'un coffrage insonorisé permettant d'atteindre une atténuation de son niveau sonore de fonctionnement de **10 dB(A)** (sensation sonore réduite de moitié).



a) avant coffrage



b) Après coffrage insonorisé



c) Toile acoustique sur le marteau

Figure 17 : Différents types d'isolation acoustique de marteau de brise roche

La *troisième action* envisageable est la mise en place de coffrages.

Pour les groupes compresseurs, la majorité des modèles sont dotés d'un capot insonorisé qu'il conviendra de veiller à ce qu'il reste fermé pendant la durée de son fonctionnement. Il est également possible d'améliorer cette isolation en installant un encoffrement supplémentaire autour de l'engin.

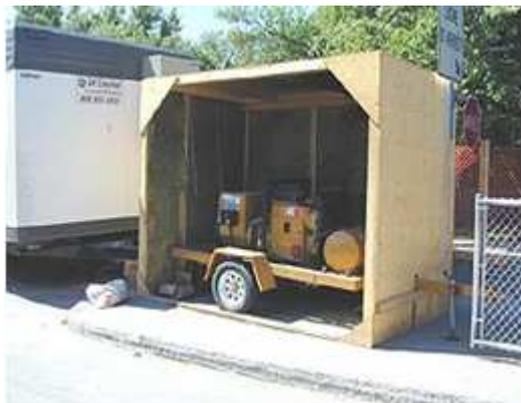
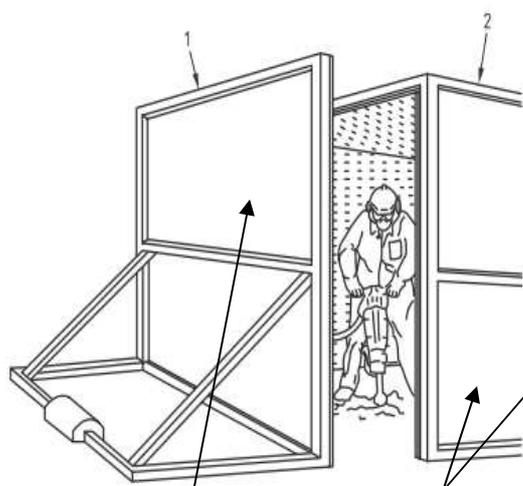


Figure 18 : Mise en place d'un coffrage autour d'un groupe compresseur.

La même technique peut être appliquée pour tout type d'activité de chantier bruyante en utilisant des barrières démontables. Elles pourront être flanquées de 50 mm d'un matériau absorbant du type laine de bois, laine minérale, ou dalle de paille, du côté du compagnon afin

de réduire l'énergie acoustique. Cela aura l'avantage de diminuer également le niveau sonore d'exposition du compagnon.



1 : Ecran amovible / 2 : Ecrans fixes

Figure 19 : Mise en place de barrières acoustiques autour d'un engin de chantier (BS 5228-1 Part 1 (2009)).

Les performances acoustiques de ce type de coffrage peuvent varier suivant qu'il existe ou non un écran amovible et si ce dernier bénéficie également d'un revêtement isolant (Voir Figure 19).

Le tableau suivant précise ces performances :

Tableau XIII : Performance d'isolation d'un coffrage dans différentes configurations (BS 5228-1 Part 1 (2009)).

Type de coffrage	Réduction du niveau sonore en dB(A)		
	Face avant (ouverture)	Sur les côtés	Face arrière
Ecrans fixes avec absorbant mais sans écran amovible	1	9	14
Ecrans fixes avec absorbant avec écran amovible sans traitement	10	6	8
Ecrans fixes avec écran amovible tous avec absorbant	10	10	10

4-1-2 Action sur la propagation acoustique :

On peut opérer avec le phénomène d'atténuation géométrique naturelle due à la distance entre la source et le récepteur.

Il pourra être appliqué dès le début de chantier en s'appuyant sur l'organisation de l'implantation du matériel de chantier.

Les sources sonores fixes comme les moteurs compresseurs, hydrauliques ou autres, pourront être entreposées dans des endroits les plus éloignés des zones à protéger.

Les baraquements de chantier pourront en revanche, être placés de telle manière qu'ils fassent un écran acoustique vis à vis des habitations avoisinantes.

Si cela ne suffit pas, il y a également la possibilité de créer sur mesure des écrans acoustiques adaptés qui seront installés aux endroits stratégiques ou, si le chantier est enclavé, tout autour du chantier.

Concernant ces écrans acoustiques, leur qualité d'atténuation n'est pas la même pour toutes les fréquences (voir annexe 3, tableau XXI). Ils sont généralement performants pour les moyennes et hautes fréquences mais beaucoup moins pour les basses fréquences. En effet, cette partie du spectre sonore correspond à des longueurs d'ondes importantes qui ont tendance à contourner l'obstacle.

Il est à noter que des recherches ont été dirigées par Mme Bénédicte HAYNE-LECOCQ et M. Jean-Louis TEBEC, professeurs au Laboratoire de Mécanique Vibratoire et d'Acoustique de l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers de Paris sur un nouveau type d'écran acoustique écologique dans le sens où il est composé d'anciens pneus de véhicules à qui l'on redonne une seconde vie.

Le mur est constitué de pneus empilés sur des tubes placés côte à côte afin de créer un mur. Sur chaque pneu, vont être percés des trous de diamètres différents qui vont se comporter comme des résonateurs d'Helmholtz.



a) Principe de montage des pneus

b) Mur de pneus du côté chantier, adossé à une barrière pleine en tôle.

Figure 20 : Principe de montage des pneus et mis en place du mur.

Le résonateur d'Helmholtz repose sur le principe que sur chaque orifice percé du pneu, l'onde incidente, à la fréquence de résonance, va faire vibrer la masse d'air situé au niveau du col. L'énergie cinétique de la vibration au niveau du col va se transformer, par frottement, en chaleur et faire diminuer ainsi l'énergie de l'onde réfléchi.

Le fait de créer des percements de diamètres différents sur chacun des pneus mis en batterie, va permettre une absorption sur un spectre plus large.

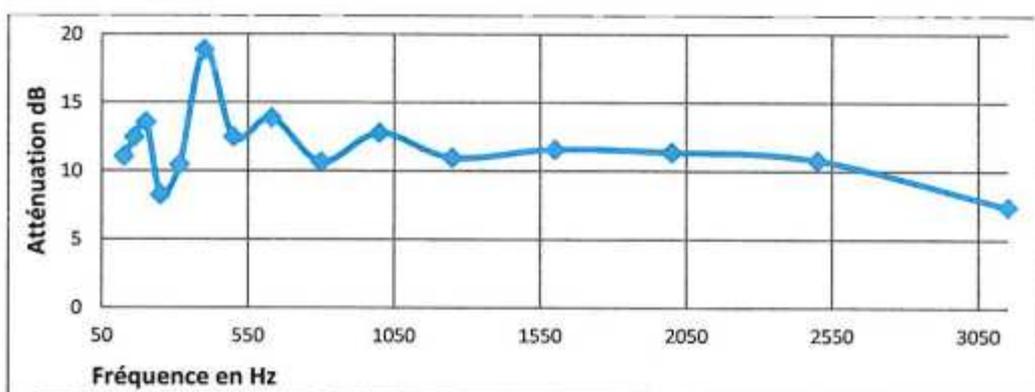


Figure 21 : Courbe de réponse atténuation / fréquences du mur de pneus de la figure 20.

Ce système permet donc une meilleure absorption de l'énergie acoustique vis à vis des compagnons basés sur le chantier, et diminue également les réflexions des ondes en direction des habitations faisant face au mur côté pneus.

Il est à préciser que **ce système est breveté et soumis à la protection intellectuelle.**

4-1-3 Action sur le lieu de réception :

La dernière action possible est d'agir sur le lieu de réception, à savoir au niveau des habitations elles-mêmes.

Les performances de l'isolation acoustique des immeubles dépendent de sa partie la plus faible.

En l'occurrence, sur les façades, ce sont les fenêtres, les volets roulants et les conduits d'aération qui sont les lieux de passages les plus importants pour la transmission du bruit en provenance de l'extérieur. Une des solutions possible est de remplacer les fenêtres par des nouvelles dont l'indice d'affaiblissement acoustique R_w soit plus important. Une isolation acoustique des volets roulants et des entrées et sorties d'aération sont également envisageables.

L'autre solution est de proposer de reloger dans un autre endroit les personnes les plus exposées pendant les périodes les plus bruyantes du chantier.

Ces solutions sont délicates à mettre en place car elles demandent de négocier aussi bien avec les locataires ou propriétaires des logements qu'avec les syndicats d'immeuble.

Elles sont donc plus difficilement maîtrisables.

Pour la première solution, il faut trouver un terrain d'entente sur le choix des matériaux à mettre en place qui n'a trait pas uniquement sur la performance acoustique de la fenêtre mais également sur son esthétique.

Pour la seconde, il faut trouver un nouveau lieu qui ne perturbe pas trop les habitudes des intéressés et qui permette un accès pas trop complexe pour les trajets professionnels ou scolaires.

Enfin, le coût peut être relativement élevé.

Ceci ne peut que mettre l'accent sur la nécessité d'anticiper le phénomène de bruit et de mettre en place un système qui agisse en priorité sur les sources sonores elle mêmes ou sur la mise en place d'écrans acoustiques dont l'efficacité et le coût seront plus contrôlables.

4-2 Isolation vibratoire :

4-2-1 Action sur la source vibratoire :

Les principales sources vibratoires qui peuvent avoir un effet sur de relatives longues distances sont le fonçage de pieux ou de palplanches, et le compactage des sols avec des engins du type rouleaux ou plaques vibrants.

Pour ces derniers, il n'est pas possible d'agir puisque ce sont ces mêmes vibrations dont on se sert pour compacter le sol. Il sera éventuellement possible d'agir au niveau du siège conducteur pour la protection du compagnon, mais ceci n'aura aucune incidence pour le voisinage proche.

En revanche, pour le fonçage de pieux, **seule le choix de la technique** permettra une amélioration de la situation. Mais elle dépendra de la nature du sol à forer, ce qui peut restreindre ce choix.

Par ordre croissant en niveau de production de vibrations solidiennes, vient la technique de fonçage par vérins hydraulique, puis celle du forage, du vibrofonçage et enfin la plus productrice reste celle du battage.

4-2-2 Action sur la propagation vibratoire

La nature du chemin de propagation étant le sol, la technique pouvant atténuer ou supprimer les vibrations est la mise en place d'une tranchée faisant barrage à leur passage.

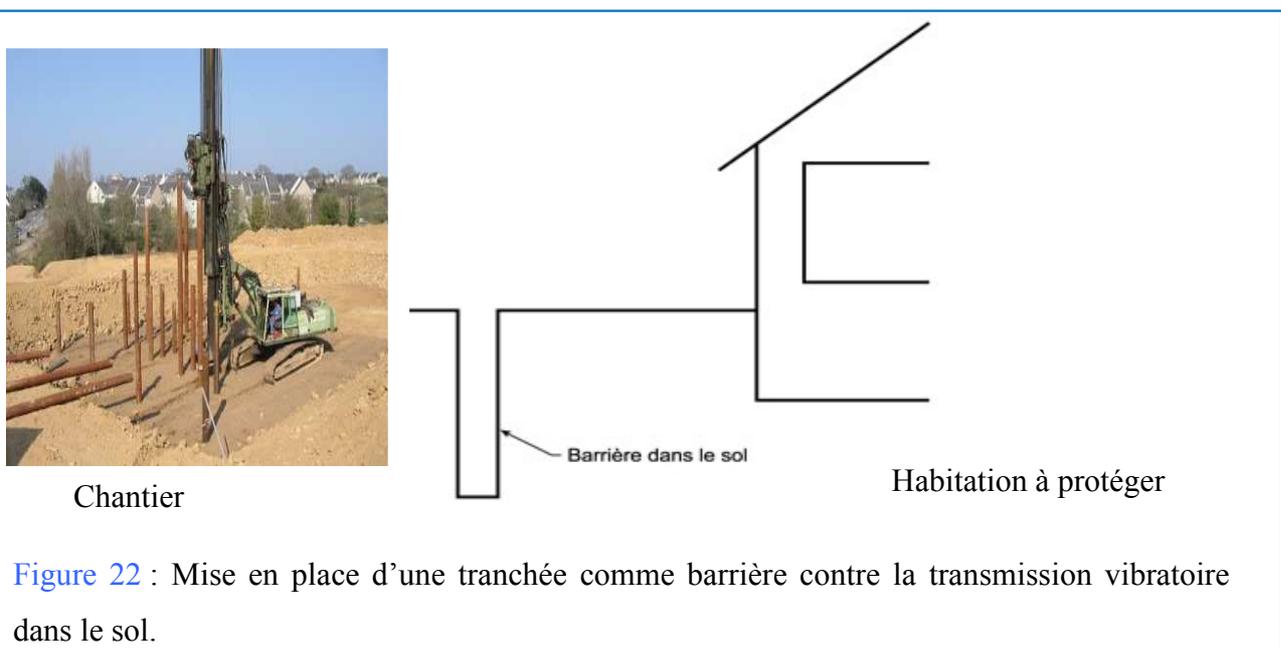


Figure 22 : Mise en place d'une tranchée comme barrière contre la transmission vibratoire dans le sol.

Ce système de tranchée est valable essentiellement pour des ondes de Rayleigh de surface. Il faut donc qu'elle soit installée à une distance assez éloignée de la source et, suite au phénomène d'atténuation géométrique, plus elle se trouvera éloigné de la source, meilleure sera son efficacité.

Par ailleurs, pour qu'elle soit opérante sur tout le spectre, il faut que sa profondeur soit de la même longueur d'onde que la fréquence de la vitesse vibratoire la plus basse à isoler.

Sachant que la longueur d'onde $\lambda = \frac{C_R}{f}$ avec C_R la célérité de la propagation vibratoire de l'onde de Rayleigh dans le sol considéré et f la fréquence à isoler, les profondeurs peuvent être assez importantes.

Aussi, pour des raisons de stabilité, il est parfois nécessaire de la remplir d'un matériau rigide comme du béton, ou un mélange de sol-bentonite. Cependant, la tranchée ouverte est plus efficace par rapport à celle remplie d'un matériau dont la rigidité est souvent plus importante que celle du sol dans lequel elle opère. Pour cette raison, certaines tranchées sont parfois comblées par un rideau de couche de gaz dont les propriétés d'élasticités sont plus importantes que celles du terrain ou il est implanté.



Figure 23 : Technique d'isolation par tranchée remplie par un rideau de couches de gaz (AL ABDEH, 2005).

En revanche, la largeur de la tranchée ouverte ne joue pas sur son efficacité en termes d'isolation vibratoire.

Enfin, pour s'isoler des ondes P volumique, il faut aller plus en profondeur. La mise en place de pieux en béton en position serrée, afin de créer une barrière de protection, est une solution envisageable. Cependant, leur efficacité en pourcentage d'isolation est inférieure au système de tranchée ouverte.

4-2-3 Action sur le lieu de réception :

Si le chantier a lieu près d'une zone particulièrement sensible aux niveaux vibratoires telle que des laboratoires de recherche avec des matériels d'optiques de précision type microscopes électroniques, une intervention d'isolation du lieu pourrait être nécessaire.

Concrètement parlant, l'appareil à isoler et son dispositif pourront être placés sur une dalle flottante en béton reposant sur des boîtes à ressorts. La difficulté résidera dans le spectre de fréquence vibratoire à isoler et s'arranger pour que la fréquence de résonance et la fréquence critique du système dalle flottante / matériel à isoler soit en dehors de ce spectre.

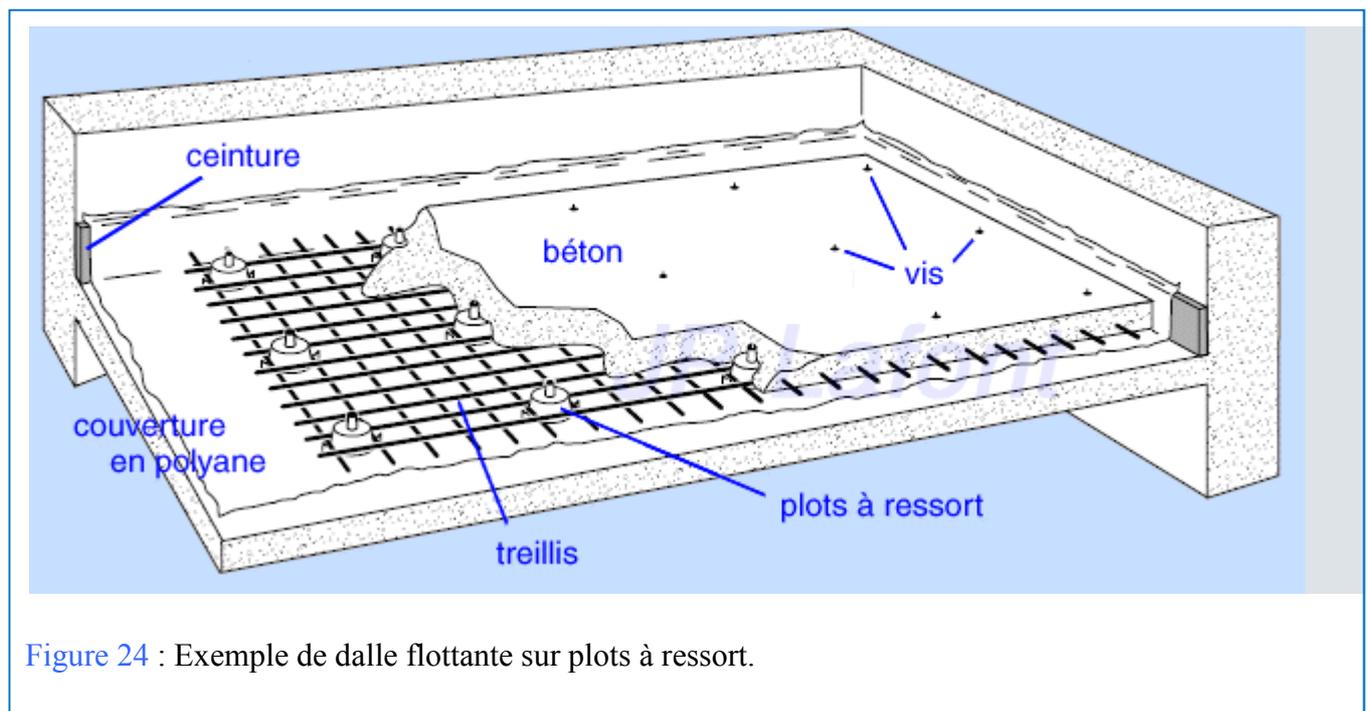


Figure 24 : Exemple de dalle flottante sur plots à ressort.

Analyse d'un chantier :

Le « Nouveau Carreau du Temple »

Dans cette cinquième partie, je vais développer l'étude et la mise en place d'une surveillance acoustique et vibratoire de chantier auxquelles j'ai participé. Elle servira de tremplin pour la sixième et dernière partie de ce document à savoir une synthèse des procédures à mettre en place pour une meilleure gestion des nuisances sonores et vibratoires d'un chantier, thème principal de ce mémoire.

Exemple de projet de gestion du bruit et vibrations de chantier

Le projet de chantier du « Nouveau Carreau du Temple », dans le 3^{ème} arrondissement de Paris qui va être exposé dans cette 5^{ème} partie, a été confié au bureau d'étude « Peutz et associés ». Il concerne la réhabilitation d'un bâtiment pour le compte d'un maître d'ouvrage public qui souhaite le transformer en un lieu culturel, donc destiné notamment aux personnes vivant à sa proximité. J'ai participé à ce projet en intégrant l'équipe qui en a eu la charge.

Je vais donc en présenter les éléments essentiels

5-1 Définition et enjeux du projet

5-1-1 Un peu d'histoire :

Le Carreau du Temple est un bâtiment qui a été conçu par les architectes Ernest Legrand et Jules Mérimondol en 1863 dans le 3^{ème} arrondissement de Paris. Initialement, il était destiné pour recevoir les exposants d'un marché. Au fil du temps, il s'est spécialisé et est devenu un lieu réputé pour la vente de vêtements.



En 1982, le bâtiment est inscrit au titre des monuments historiques.

Cependant, au fil du temps, plus aucune activité ne s'y faisait.

Aussi en 2003, un concours d'idée est lancé par la mairie du 3^{ème} arrondissement pour sa réhabilitation. Les habitants de l'arrondissement ont voté pour une des trois propositions d'orientation du nouveau projet de rénovation qui sont les suivantes :

- Tout pour le sport
- La culture d'abord
- Un espace pour tous.

C'est la dernière proposition qui a été élue. Un concours d'architecture a été lancé en 2007. Le projet retenu est celui de l'architecte Jean-François MILOU (maître d'œuvre).

5-1-2 Nature du projet :

Le projet « Un espace pour tous » va intégrer également les deux autres propositions et transformer cet endroit en un lieu de culture et de sport sur 10 000 m² répartie sur deux niveaux :

- Au rez-de-chaussée, un espace d'exposition ainsi qu'un auditorium de 250 places (théâtre, musique, ciné-club...)
- Au sous-sol, plusieurs salles de sports, une salle d'enseignement de la musique, et un studio d'enregistrement numérique.



5-2 Etude acoustique et mise en place d'une surveillance acoustique et vibratoire :

5-2-1 Définition d'une station de surveillance:

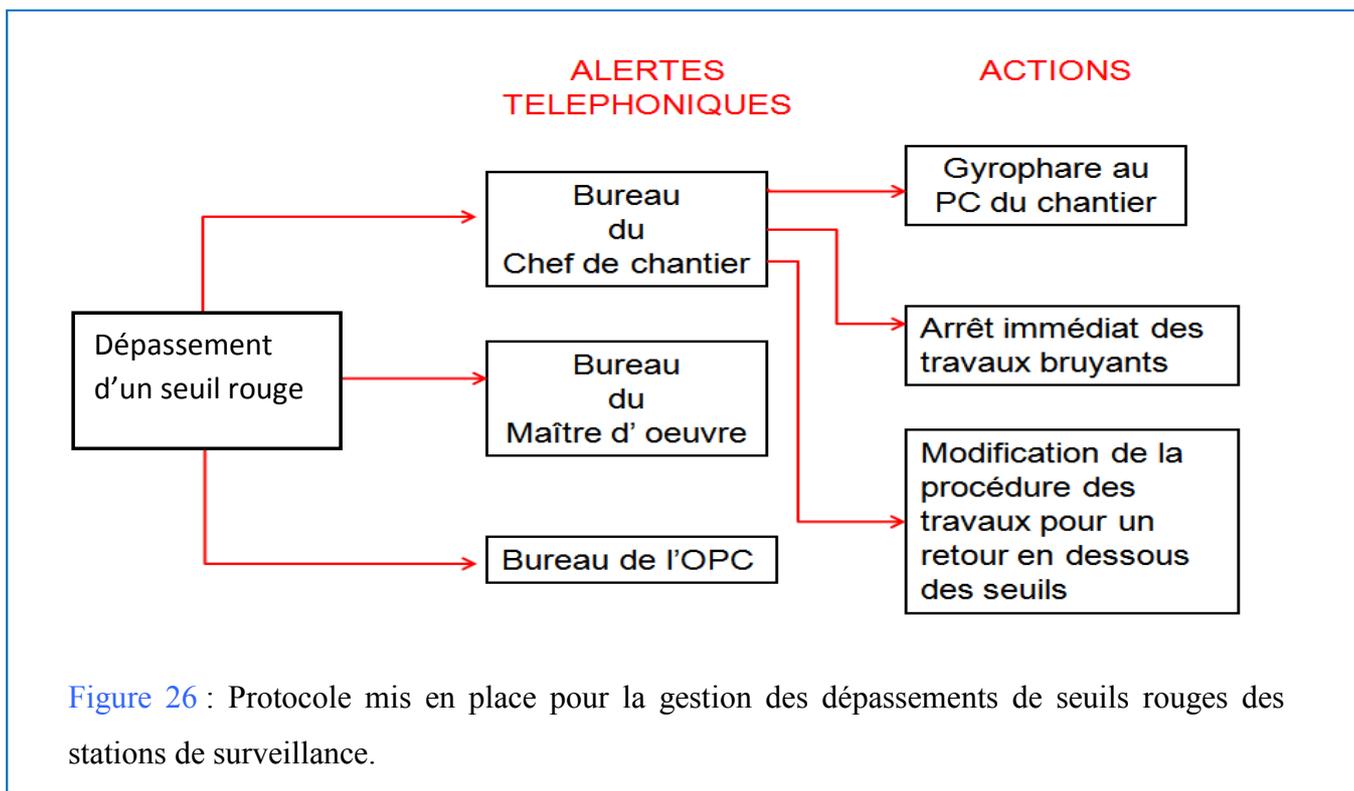
Une station de surveillance peut se décliner en deux grands principes : acquisition de données, et traitement de données.

Pour l'acquisition des données, la station de surveillance acoustique et vibratoire est constituée d'un microphone et d'un accéléromètre. Ces transducteurs transforment respectivement une onde aérienne en pression et une onde solide en accélération, en un signal électrique. Ce signal électrique est ensuite conditionné pour être exploitable en un signal numérique afin de pouvoir être transmis ensuite, par Modem, à un serveur. La personne responsable de la surveillance aura la possibilité de recueillir les informations sur cette interface quand elle le souhaitera à l'aide d'un simple ordinateur relié au réseau internet.

Le second principe a pour but de mieux gérer les nuisances éventuelles dues à l'activité du chantier. Pour cela, un premier traitement des données va être effectué. Un Leq glissant de 2 minutes va être comparé à un niveau seuil qui sera défini par le programmeur. Dès qu'il y a un dépassement, sur un listing est noté la date et l'heure de l'évènement et un enregistrement audio de 10 secondes est réalisé pour ensuite être consultable dans cette mémoire du serveur afin de pouvoir identifier la source sonore ou vibratoire responsable de ce dépassement.

Pour ce chantier, il y a deux objectifs à atteindre :

- Le premier est de s'assurer du respect des horaires de chantier par les différentes entreprises sur le site, à savoir ne pas commencer ni avant ni après les périodes prédéfinies. Pour cela, un premier seuil, appelé seuil orange, a été défini qui, lorsqu'il est dépassé en dehors des horaires, permet l'enregistrement audio afin de caractériser le type d'activité et identifier la société mise en cause.
- Le second objectif, est d'éviter des niveaux sonores ou vibratoires extrêmes. Un second seuil, nommé seuil rouge, entraîne bien sûr un enregistrement audio mais surtout une réaction en chaîne. Elle consiste à alerter en temps réel par voie téléphonique les différents responsables du chantier afin que des actions puissent être prises immédiatement pour retrouver une situation moins extrême.



5-2-2 Détermination des emplacements des balises

Au regard de la configuration du lieu, il a été opté de mettre en place trois stations de surveillance situées en face des immeuble suivants :

- rue Dupetit Thouars (surveillance acoustique),
- rue Perrée (surveillance acoustique),
- Cour intérieure de l'immeuble RIVP situé rue Picardie (surveillance acoustique et vibratoire).

Comme cela a été précisé dans la partie II, il n'y a pas d'obligation réglementaires ni de normes obligatoires à respecter.

Dans ce contexte, la difficulté pour définir ce seuil réside dans le fait qu'il puisse, d'une part, permettre la réalisation du chantier mais, d'autre part, permettre également d'éviter des niveaux excessifs, en sachant que cette notion est à fort potentiel suggestif.

Une étude acoustique et vibratoire a été réalisée sur site le 17 décembre 2009, bien avant mon arrivée dans l'équipe, à savoir le 1^{er} septembre 2011.

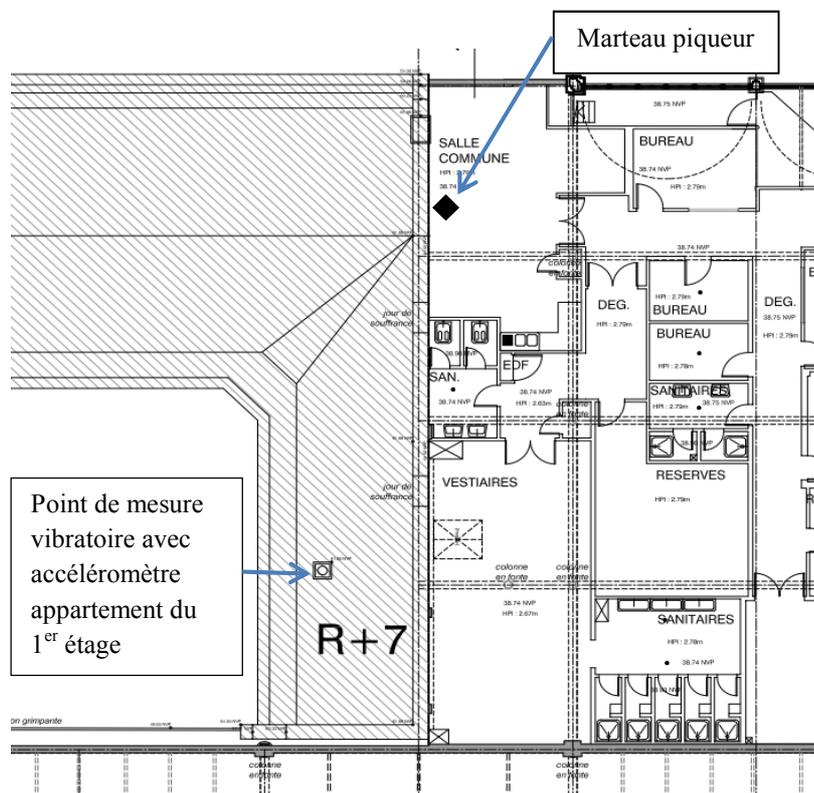
Elle consistait donc à définir des seuils pour les balises acoustiques et vibratoires afin de pouvoir contrôler au mieux l'impact de l'activité du chantier sur le voisinage proche.

Station de surveillance de l'immeuble RIVP

Une attention particulière a voulu être donnée pour les appartements situés dans l'immeuble RIVP dont la situation est très proche des limites du chantier.

Au début de l'opération, afin d'obtenir une idée plus précise des niveaux reçus dans les appartements de cet immeuble, il était question de laisser le microphone de la balise dans une pièce inoccupée d'un appartement habité du 1^{er} étage. Le problème est de pouvoir distinguer les bruits en provenance uniquement de l'activité du chantier de ceux produits par l'activité de l'habitant. Il a donc été opté de coupler à ses mesures acoustiques un capteur de vibrations. Il a fallu déterminer un seuil qui, lorsqu'il était dépassé pendant plus de 2 minutes, provoquerait également un enregistrement audio afin de pouvoir déterminer quel type d'activité est à l'origine de la gêne et permettait également d'éviter ou de distinguer, dans l'analyse future des résultats de mesure, les bruits d'impact en provenance directement de l'activité des locataires de l'appartement en question ou des appartements contigus.

Pour la détermination de ce seuil vibratoire, il a été utilisé comme source de vibration un marteau piqueur activé à l'emplacement des futurs travaux, et un accéléromètre dans le lieu de réception qui était en l'occurrence à l'intérieur d'un appartement sur cour au 1^{er} étage de l'immeuble rue de Picardie(*). Le seuil orange retenu en niveau d'accélération est un $L_{aeq} = 78,5 \text{ dB}$ (niveau d'accélération de référence $a_0 = 10^{-6} \text{ m.s}^{-2}$).



Au fil du temps, il s'est avéré que, malgré le couplage des transducteurs, les perturbations sur les mesures dues à la vie quotidienne des locataires, étaient importantes et rendaient difficile la lecture des résultats. Il a donc été opté de déplacer les capteurs à l'extérieur de l'appartement, le microphone placé dans la cour intérieure et l'accéléromètre fixé sur le mur extérieur de l'immeuble. Le seuil orange de déclenchement a donc été modifié pour la balise acoustique mais celui dédié à l'accéléromètre a été conservé puisque la vibration dans la structure d'immeuble reste globalement la même à l'extérieur ou à l'intérieur du mur de support.

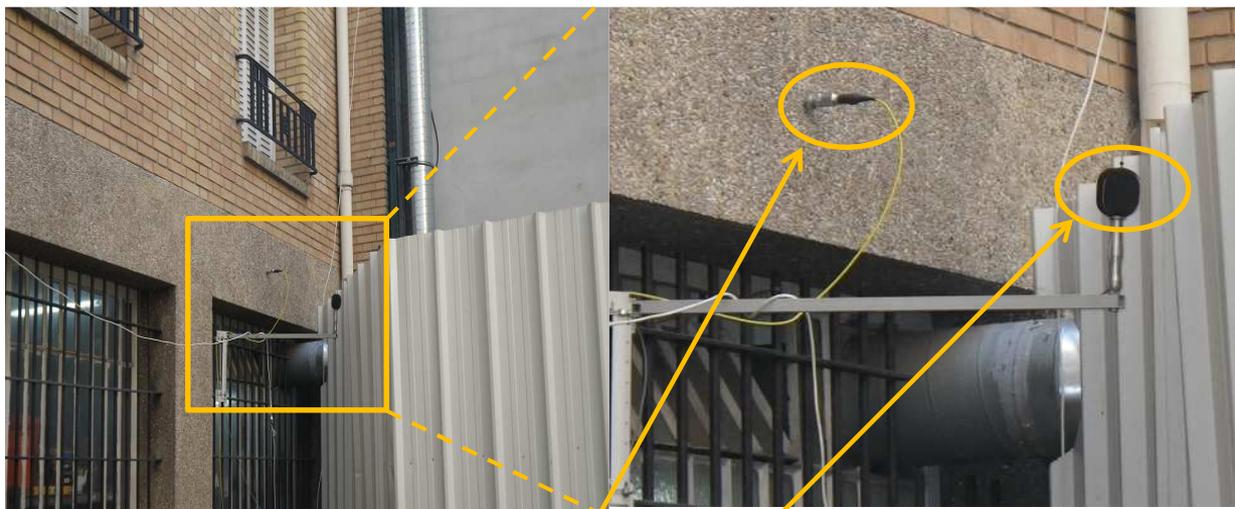


Figure 27 : Emplacement de l'accéléromètre et du microphone de la station de mesure située dans la cour d'immeuble RIVP.

Détermination des seuils des balises

Pour les autres immeubles situés à la périphérie du chantier, l'étude acoustique a été poursuivie. Il a été obtenu comme relevé de bruit résiduel à l'intérieur des appartements, à savoir, le niveau sonore équivalent pondérés A sans l'activité gênante des travaux, un niveau $L_{Aeq} = 42 \text{ dB(A)}$. Dans le langage courant, ce niveau bruit résiduel est souvent appelé niveau du bruit de fond, mais les différentes réglementations sur le bruit utilise le terme niveau de bruit résiduel que j'utiliserai donc dans la suite de ce mémoire.

La base de réflexion, pour l'établissement du seuil orange de la future station, s'est fixée à une émergence de 3 dB(A) dans les appartements par rapport au bruit résiduel (à titre d'information, niveau d'émergence maximum admissible par la réglementation sur le bruit de voisinage en période nocturne sur une plage de plus de 8 heures, mais qui n'est pas applicable pour les bruits de chantier).

Pour obtenir cette émergence de 3 dB(A), ce qui correspondrait donc à un niveau de Bruit Ambiant (=niveau sonore du lieu avec la source génératrice de nuisances) B.A = 45 dB(A) dans l'appartement, il faut ajouter un niveau de bruit égale à celui du résiduel (42 dB(A) + 42 dB(A) = 45 dB(A)).

Donc, pour ajouter un niveau de bruit de 42 dB(A) dans l'appartement qui possède une isolation de façade de 30 dB(A), cela revient à obtenir un niveau de 72 dB(A) en façade des immeubles.

Les stations de surveillances, pour des raisons de sécurité du matériel, doivent rester en périmètre du chantier. Des mesures complémentaires ont permis d'établir que pour obtenir un niveau de 72 dB(A) en façade d'immeuble, cela correspondait, en tenant compte de l'atténuation géométrique, à un niveau de 76 dB(A) en limite de chantier. Donc le **seuil orange acoustique** retenu est de **76 dB(A)**.

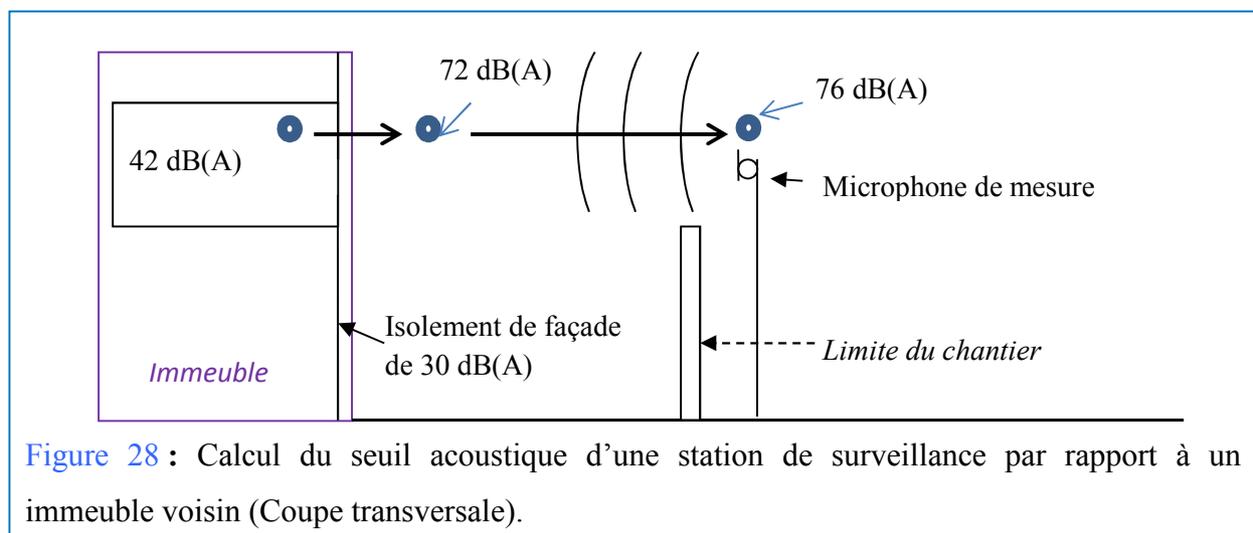


Figure 28 : Calcul du seuil acoustique d'une station de surveillance par rapport à un immeuble voisin (Coupe transversale).

Les seuils orange acoustiques sont donc de 76 dB(A) pour les stations faisant face aux immeubles situés rue Dupetit Thouars et rue Perrée. Pour la station située dans la cours de l'immeuble rue de Picardie, la même procédure a donné un seuil orange acoustique de 70 dB(A) en périphérie du chantier.

Pour la détermination des seuils rouges, donc les seuils extrêmes entraînant une intervention immédiate sur le site, un niveau de +15 dB au-delà du seuil orange a été retenu.

La carte suivante schématise l'implantation du système de surveillance mise en place.

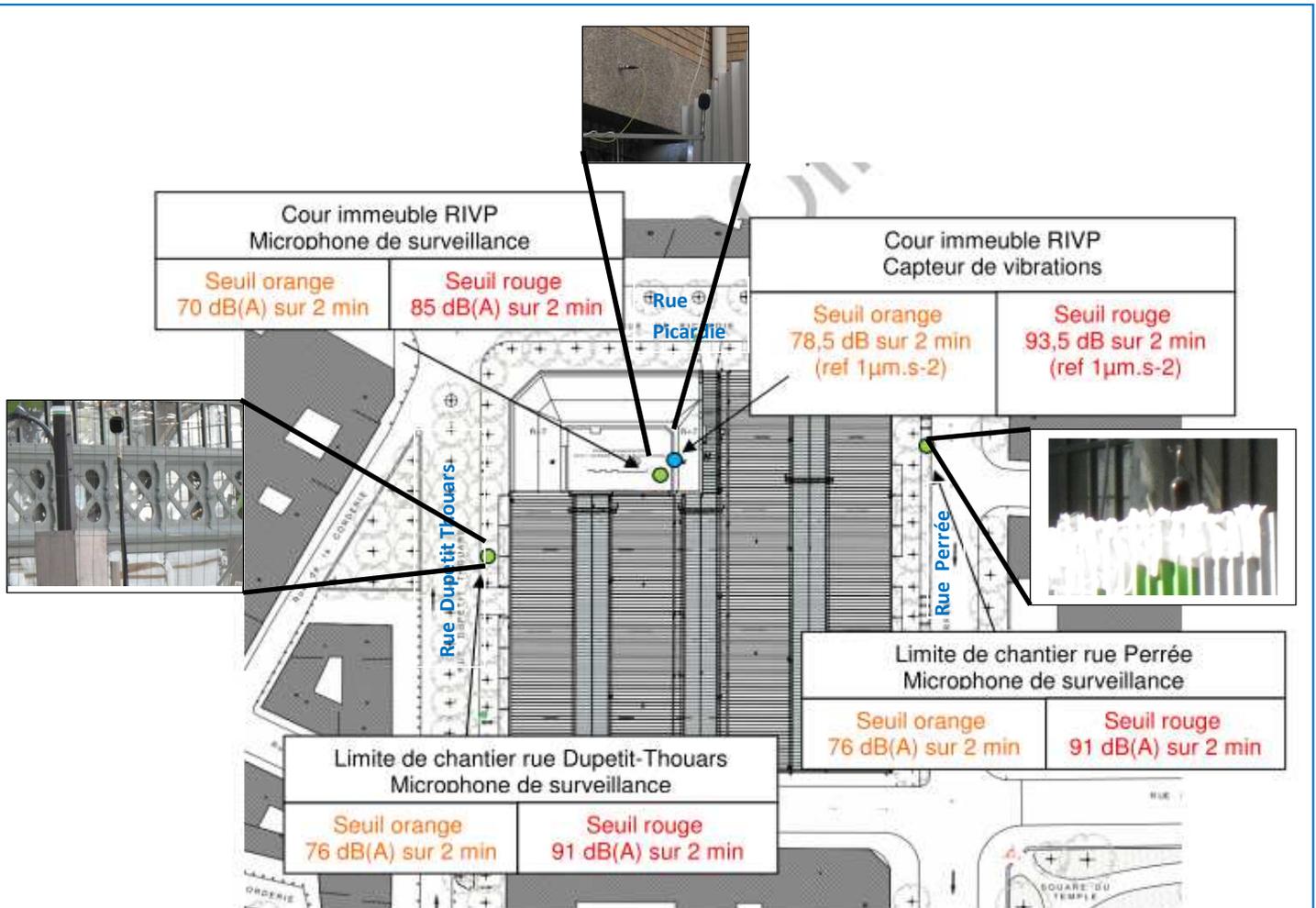


Figure 29 : Mise en place des 3 stations de surveillances sur le site.

5-2-3 Compléments au dispositif de surveillance :

Dans le phasage des travaux, il y a des périodes qui seront déclarées particulièrement bruyantes (terrassement, utilisation de brise-roche etc...) ou entraînant des niveaux vibratoires supérieurs à l'habituel. En effet, il peut arriver que, par l'organisation des travaux, il ne soit pas possible de réduire la présence d'engins pour une phase du chantier pour que celle-ci puisse être réalisée avec efficacité et sécurité. Ces périodes étant planifiées, elles font l'objet d'une information préalable du voisinage par affichettes déposées dans chacune des boites aux lettres individuelles des différents immeubles avoisinants, au moins une semaine avant le jour dit. Ce jour déclaré bruyant ne répondra pas aux alertes rouges.

Par ailleurs, un panneau électroluminescent, dirigé sur l'extérieur au chantier, permet d'afficher des informations sur la nature des travaux envisagés pour chacune des journées en cours.

5-3 Analyse de 6 mois de surveillance :

Chaque mois, le service de la maîtrise d'œuvre transmettait au bureau d'étude un listing sur lequel figuraient les résultats de la surveillance acoustique du site sur la période considérée. Ce listing précisait, pour chaque balise individuelle, la période de dépassement des seuils orange ou rouge de plus de 2 minutes et, dans une colonne « observations », par l'écoute de l'échantillon sonore concomitant au dépassement, la source sonore ou vibratoire à l'origine du signalement.

Ensuite, il m'était donné d'analyser les résultats et de réaliser une synthèse statistique afin de, vérifier, d'une part, si le nombre de dépassements étaient importants ou pas en précisant ceux qui sont dus effectivement à l'activité du chantier de ceux dus à l'environnement urbain (Ex : pot d'échappement défectueux d'une voiture ou d'un scooter à l'arrêt, puis en démarrage, ou moteur de groupe frigorifique d'un camion transportant des denrées congelées ou surgelées et qui ont enclenché l'enregistrement de dépassements de seuil mais qui ne sont pas dus à l'activité de chantier). Ce rapport d'analyse était destiné à la maîtrise d'ouvrage qui ensuite était transmise à la maîtrise d'œuvre. Les conclusions de cette étude pouvaient être l'occasion de prescriptions ou recommandations afin que des comportements déclarés trop bruyants par rapport aux seuils acoustique ou vibratoire retenus ne puissent plus se répéter ou du moins être mieux maîtrisés.

Le système mis en place de la gestion bruit et vibration formait une boucle. La maîtrise d'œuvre, en place sur le chantier, obtenait le listing des dépassements qu'il envoyait à notre bureau d'étude pour analyse des résultats que nous transmettions ensuite au maître d'ouvrage qui le communiquait au maître d'œuvre qui, normalement, devait tenir compte des remarques dont faisait l'objet notre rapport. La boucle était bouclée et elle permettait ainsi à ce que tous les intervenants sur ce chantier en soient informés.

Dans le temps, ces rapports techniques mensuels permettaient également de comparer les différentes périodes entre elles.

Tableau XIV : Exemple de rédaction des conclusions des résultats d'analyse des listings des stations de surveillance acoustique.

BILAN SEMAINES 4 & 5

	Nombre de dépassements seuils orange en dehors des horaires de chantier		Dépassements seuils orange entre 6h et 19h du lundi au vendredi		Dépassements seuils rouges entre 6h et 19h du lundi au vendredi	
	Nb	Origine	Nb	Origine	Nb	Origine
Rue Spuller	1	Nettoyage des rues	1	Nettoyage des rues	0	
Rue de Picardie	9	Le 26/01 à 7h20 : benne secouée Le 28/01 à 17h15 : remplissage benne Le 01/02 à 12h30 : sciages et machines Le 02/02 à 17h15 : marteaux Le 03/02 à 19h00 : perceuse (particulier ou chantier ?) Autres événements : nettoyages des rues	32	Remplissage de la benne, changement de benne, sciages et marteaux Nettoyage des rues	1	Le 01/02 à 8h04 : Chargement de la benne particulièrement violent + avertisseur de recul
Bâtiment RIVP	9	Le 25/01 à 12h11 : sciage dalles Autres événements : interférences avec téléphone portable ou bruit d'activités dans l'appartement.	114	Sciages, marteaux, perceuses, marteau piqueur	0	Les 02/02 et 03/02 : Marteau piqueur Le système de surveillance n'a pas déclenché d'alertes.

Remarques et actions :

Quelques dépassements d'horaires, en particulier rue de Picardie où un changement de benne a eu lieu à 7h20 le 26/01. Nous rappelons que cela doit être effectué à partir de 8h. Les autres dépassements ne sont généralement pas excessifs et souvent liés à des activités autres que le chantier (nettoyage des rues, bruit d'activités dans l'appartement, bruit d'interférence dans les capteurs).

Le chargement de la benne a déclenché une alerte rouge le 01/02. L'opérateur qui manipule le chargeur doit veiller à déposer les gravats dans la benne avec « douceur » lorsque celle-ci est vide. Le système de surveillance n'a pas déclenché d'alerte alors que les seuils rouges ont été dépassés les mardi 2 et mercredi 3 février. L'entreprise doit vérifier son installation. Les dépassements de seuils sont dus à la désolidarisation des planchers béton au moyen de marteaux piqueurs.

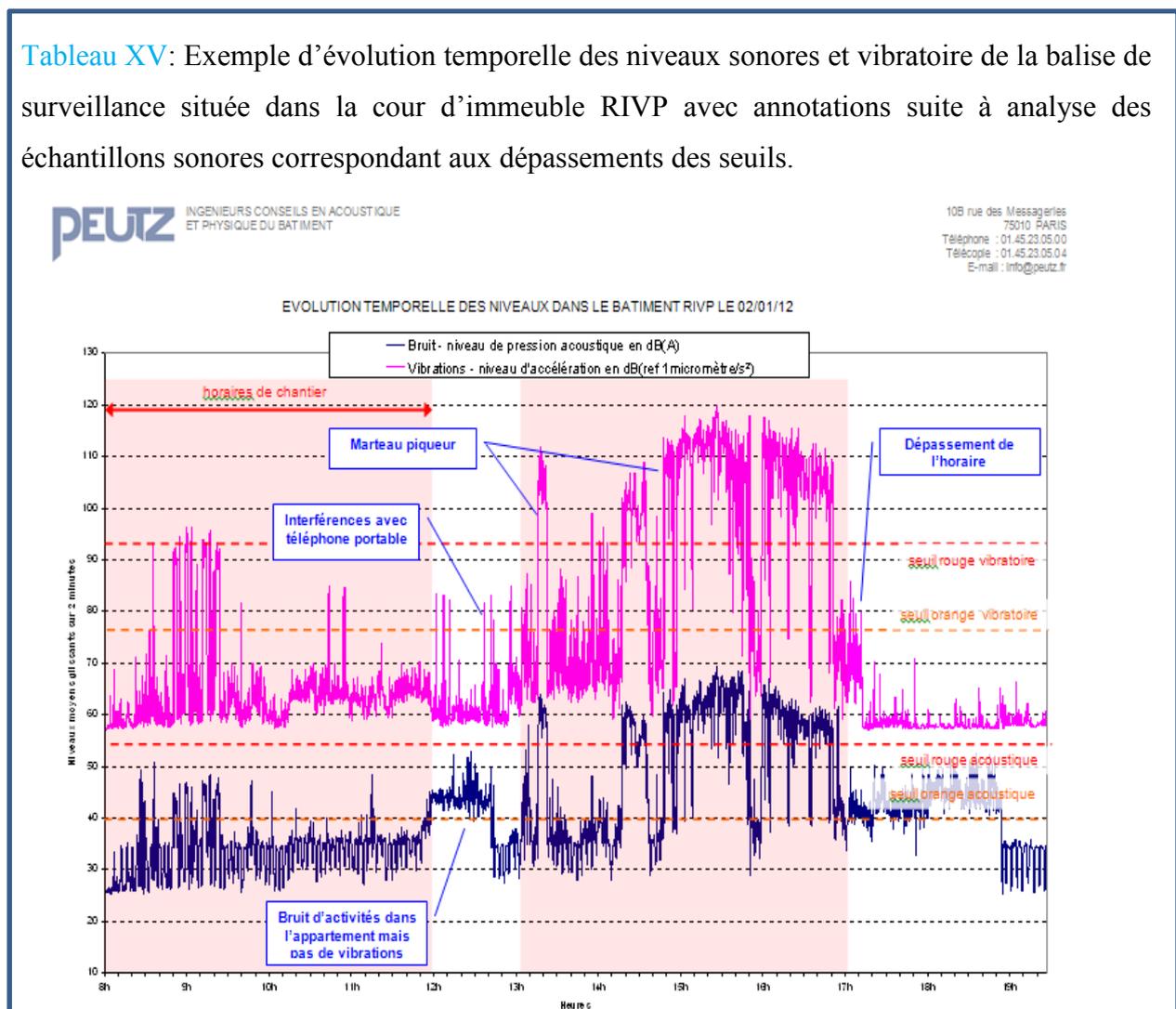
Par ailleurs, il s'est avéré qu'une pétition relative à une plainte du voisinage est arrivée sur le bureau du maître d'ouvrage. Cet évènement n'a été communiqué au bureau d'étude que trois semaines après son dépôt au regard des dates de rédactions des plaintes.

Cette nouvelle information a entraîné une analyse plus poussée des résultats sur la période à l'origine des plaintes qui s'étendait sur des journées éparses sur plusieurs mois.

Afin de vérifier la fiabilité du système mis en place, la société responsable de la location et de la mise en place du système de surveillance nous a autorisé à accéder directement aux données sur leur serveur qui était, à l'origine, protégé par des mot de passes informatiques détenus uniquement par la maîtrise d'œuvre et qui, suite à cet évènement, nous ont été communiqués.

J'ai donc entrepris une relecture des courbes temporelles des niveaux sonores enregistrés sur leur plateforme. A l'aide de leur logiciel, j'ai refait « manuellement » des Leq glissants sur deux minutes sur chaque journée d'enregistrement sur une période de 3 mois non consécutifs mais dispersés au regard des jours déclarés particulièrement bruyants par le voisinage participant à la pétition. Ce travail a été réalisé sur chacune des balises prises individuellement.

Tableau XV: Exemple d'évolution temporelle des niveaux sonores et vibratoire de la balise de surveillance située dans la cour d'immeuble RIVP avec annotations suite à analyse des échantillons sonores correspondant aux dépassements des seuils.



Ma démarche était de vérifier, d'une part, si le nombre de dépassements que j'ai recalculé correspondait avec celui précisé sur le listing et, d'autre part, si la source sonore indiquée dans les observations était cohérente avec l'échantillon sonore enregistré suite aux dépassements des différents seuils.

Les résultats de mes recherches mettaient en évidence que les informations enregistrées sur le listing étaient à 98 % correctes (les 2 % de différence peuvent provenir d'un problème d'arrondis lors des recalculs sur les courbes ou d'une légère différence dans la programmation du Leq 2 minutes sur le graphique) avec les courbes enregistrées sur le serveur à savoir que le nombre de dépassements de seuils orange et rouge ainsi que les sources sonores à l'origine du signalement étaient corrélés.

En revanche, pour certains jours ouvrés, aucune donnée n'était enregistrée et parmi ces journées, certaines faisaient partie de celles déclarées particulièrement bruyantes par les voisins.

Tableau XVI : Exemple de synthèse des résultats sur une période de d'un an pour la station de surveillance située dans la cour d'immeuble R1VP.

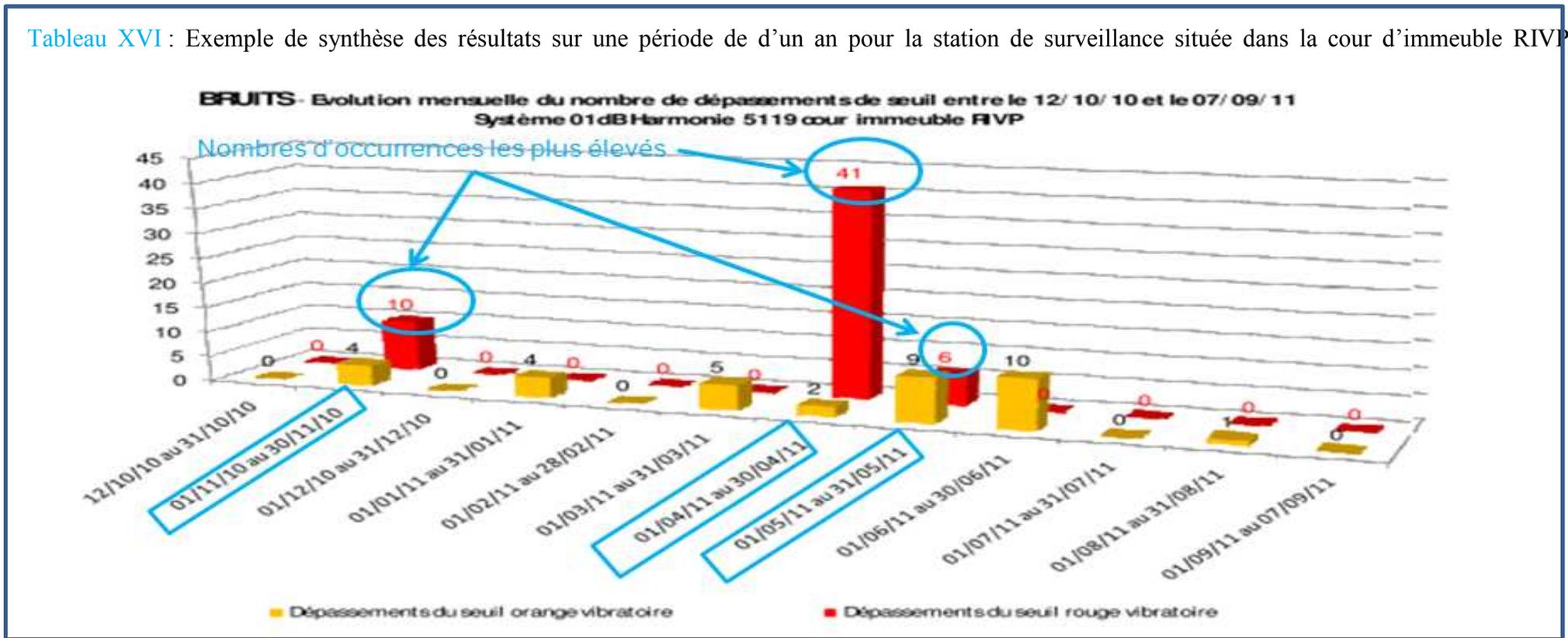
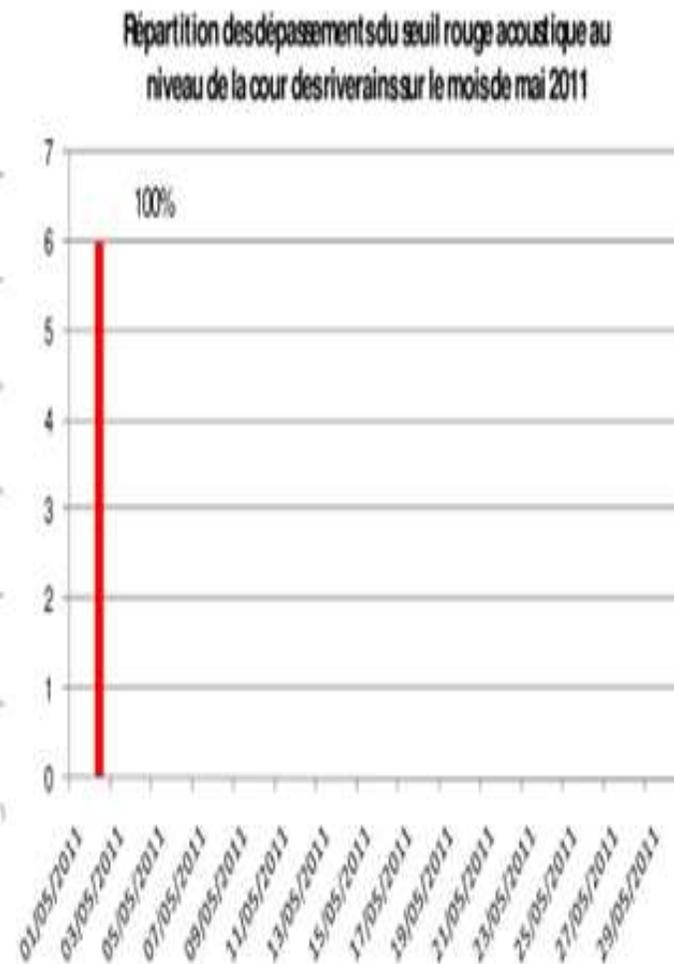
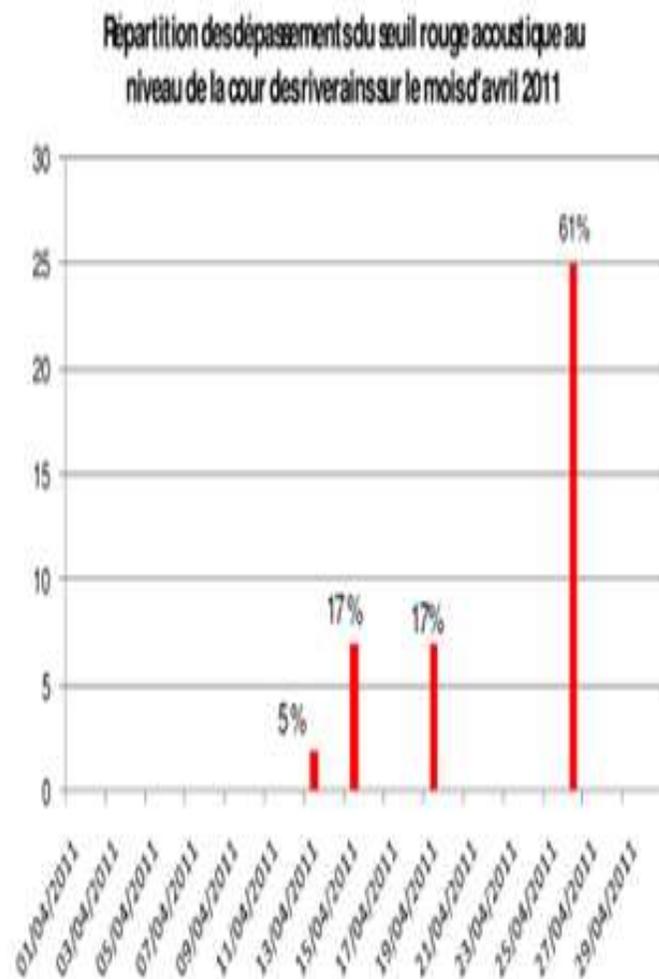
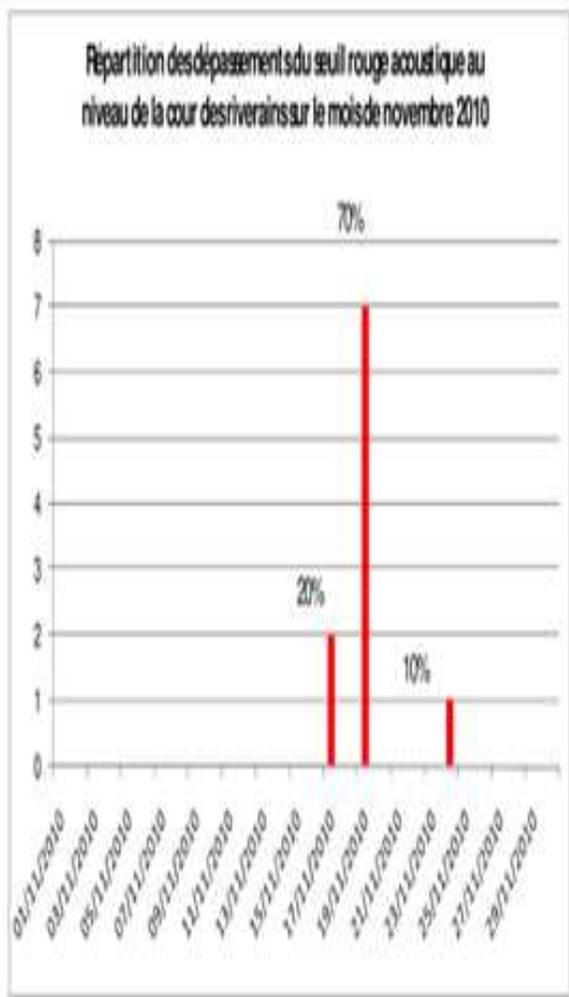


Tableau XVII : Exemple d'analyse statistique des 3 mois les plus bruyants visés dans le tableau XVI en provenance des enregistrements de la station de surveillance située dans la cour d'immeuble RIVP.



Fort de ce constat, c'est toute la chaîne de surveillance qui a été contrôlée. Ceci a permis de mettre en évidence les éléments suivants :

- Le protocole des alertes rouges ne fonctionne pas. Une visite sur le site expliqua en partie le phénomène : un incendie a eu lieu dans un des baraquements où se trouvait notamment l'ordinateur qui recevait les messages d'alerte rouge et qui mettait en activité le gyrophare sur le site et l'enclenchement des messages téléphoniques vers les responsables du chantier.
- Dans ce même incendie, le tableau électroluminescent avait également été mis hors service.
- La remise en activité de toute l'installation était en cours et était notamment retardée en attendant d'une pièce de connectique en commande.
- Le problème des fichiers de données manquants sur le serveur était dû aux systèmes individuels d'alimentation électrique des stations de surveillance qui, parfois, étaient défaillants.

Il a donc été demandé à la maîtrise d'œuvre de veiller à remettre le système de surveillance initiale en place et de veiller à son bon fonctionnement notamment en ce qui concerne l'alimentation des bases de surveillance acoustique et vibratoire.

Ce problème de plainte est survenu à l'issue de mon stage dans ce bureau d'étude. Je ne peux donc pas préciser si la situation s'est rétablie correctement à l'issue des résultats de mes analyses et du contrôle réalisé in situ.

Cependant, de cette expérience, je peux en tirer les éléments suivants, précisés dans les conclusions qui vont suivre, pour une amélioration de la gestion sonore et vibratoire d'un chantier en général et de ce chantier en particulier.

▼ Conclusions :

Une surveillance de chantier a pour but premier d'alerter quand une situation sera déclarée critique par rapport à des critères acoustiques ou vibratoires choisis. Ensuite, que faire de ses alertes ? La réponse à cette question dépendra de la volonté du maître d'œuvre ou du maître d'ouvrage. En effet, soient elles sont enregistrées et serviront uniquement de points de repère lors de plaintes éventuelles du voisinage, soient elles seront également le déclencheur d'actions ayant pour but d'améliorer une situation critique.

C'est dans cette deuxième perspective que s'inscrivait notre mission. De cette expérience, je propose les éléments suivants pour une meilleure approche de cette problématique.

Dès **la première semaine** de la mise en place du système de surveillance, prêter une attention particulière sur les points suivants :

- 1- **vérifier** scrupuleusement, **à la source**, donc sur le serveur, les fichiers d'enregistrements et s'assurer qu'ils coïncident avec les alertes rouges et oranges diffusées automatiquement par listing informatique et s'assurer ainsi du bon fonctionnement de toute la chaîne de surveillance ;
- 2- Entreprendre un test inopiné sur site d'une d'alerte rouge à l'aide d'une source sonore (CD de bruit de chantier préenregistré) amplifiée importée au niveau d'un des microphones d'une des stations de surveillance sur site afin de se garantir du bon fonctionnement du système d'alerte et observer les réactions et les conséquences sur le chantier
- 3- Organiser une réunion d'information avec tous les intervenants impliqués dans cette surveillance afin, d'une part, que ces personnes puissent se connaître et favoriser ainsi une meilleure communication entre elles dans le futur et permettre également de sensibiliser plus particulièrement les compagnons à la problématique bruit de chantier dans le cadre préventif de sa propre protection ainsi que celle du voisinage proche. D'autre part, ce sera l'occasion de faire le point sur le fonctionnement du système mis en place et d'engager d'éventuelles modifications du processus si nécessaire. Enfin, dans le cadre prévisionnel des travaux, se renseigner sur l'activité du chantier pour le mois qui vient notamment en ce qui concerne la prévision et l'information du voisinage pour les périodes déclarées excessivement

bruyantes. Ce type de réunion sera à réitérer une fois par semaine au tout début de chantier (ou à intégrer à l'ordre du jour lors des réunions de chantier), correspondant à la période de la réalisation du gros œuvre qui est habituellement celle qui est la plus importante en activité sonore et/ou vibratoire potentielles ;

- 4- Recueillir, auprès du responsable du chantier, les demandes ou remarques éventuelles que le voisinage aurait formulé afin d'y répondre favorablement dans la mesure du possible ;

- 5- Pour ce chantier en particulier, refaire une étude statistique en abaissant les seuils rouges qui ont peut-être été réglés à un niveau trop élevés à savoir, les recalculer à +10 dB par rapport au seuil orange au lieu des + 15 dB actuels, et revoir le système prévisionnel qui demandera, suite à cet abaissement de niveau critique, une attention plus marquée. En effet, une augmentation des pourcentages des périodes déclarées excessivement bruyantes risquent de s'ensuivre mais cette nouvelle situation sera peut être plus proche de la gêne que peuvent ressentir le voisinage. Cette nouvelle analyse devrait résulter d'une concertation avec la maîtrise d'œuvre sur l'organisation des différentes phases du chantier afin qu'elles soient repensées et voir s'il n'est pas possible de mettre en place les différents traitements d'isolation entrevus dans la 4^{ème} partie de ce document.

Ces remarques ne valent que si la maîtrise d'œuvre et / ou d'ouvrage est prête à accepter de nouvelles contraintes dans l'organisation des travaux au regard des délais et des coûts qui peuvent s'ensuivre. Si ce n'est pas le cas, il sera difficile de faire évoluer dans le bon sens ce type de situation.

•De cet exemple de projet de gestion des nuisances d'un chantier, j'ai pu en décrire les différentes étapes pour la mise en place d'une surveillance acoustique et vibratoire du site de construction. De cette expérience, il en ressort que le projet initial doit s'adapter à l'évolution du chantier afin d'y apporter les modifications qui s'imposent pour en améliorer l'efficacité.

C'est sur cette lancée que va s'amorcer la sixième et dernière partie de cette étude qui va s'atteler à exprimer les différentes étapes à respecter pour l'élaboration et l'amélioration d'un projet de gestion des nuisances d'un chantier.

Procédure pour une meilleure gestion des nuisances sonores et vibratoires sur un chantier

Le but annoncé de ce mémoire, est de réaliser une sorte de feuille de route qui permettrait, dès la conception du programme de travaux, la prise en compte de l'impact de l'activité du futur chantier sur son environnement immédiat et notamment du voisinage proche. Cette approche permettrait ainsi d'éviter des plaintes du voisinage qui pourraient se poursuivre devant les tribunaux civils et pouvant entraîner éventuellement des ralentissements des travaux et l'obligation de verser des dommages et intérêts aux personnes dont le logement aurait été impacté par cette activité.

Dans le domaine de l'acoustique comme pour celui des vibrations, il est souvent plus opportun, budgétairement parlant, d'agir en amont du projet, en planifiant des dispositions adaptées aux différentes phases du chantier que d'agir en catastrophe, au dernier moment, au gré des plaintes reçues du voisinage.

Dans un premier temps, c'est cette partie prévisionnelle, la plus importante, qui sera développée en essayant d'être le plus exhaustif possible.

Cependant, les erreurs de prévisions ne sont pas nulles et un chantier est toujours également accompagné de son lot d'impondérables auxquels il faudra faire face. Il conviendra donc, dans un second temps, de mettre en place une surveillance de chantier pour un meilleur contrôle in situ pendant toute sa durée.

Enfin, une fois le chantier terminé, un retour d'expérience permettrait de faire le point sur ce qui a bien fonctionné et expliciter également les difficultés auxquelles il a fallu faire face. C'est ce qui va être exprimé dans un troisième temps.

6-1 Organisation en amont du chantier

6-1-1 Etude environnementale et communication

Dans un premier temps, une étude environnementale est nécessaire.

Elle consiste à préciser les caractéristiques du quartier où va s'insérer le chantier. Est-ce un quartier résidentiel, d'affaire, de commerce ? Repérer les points sensibles qu'il conviendra de protéger particulièrement. Ceci peut être des crèches, des écoles, des dispensaires, des maisons de retraite, des hôpitaux, des laboratoires avec des appareillages à très haute sensibilité vibratoire etc....

Ensuite, une lettre d'information sera à réaliser, dans un premier temps, par voie de presse, qui précisera d'une part la nature du futur projet de chantier et, d'autre part, son intérêt social et /ou sociétal.

Dans un second temps, une information plus ciblée par affichette déposées dans les boites aux lettres, reprendra les termes de l'annonce par voie de presse et sera accompagné d'un questionnaire pour une étude de voisinage. Elle pourra demander aux riverains du futur chantier, s'ils ont déjà vécu l'expérience d'un chantier dans ce même quartier ou dans un autre lieu. Quel a été leur ressenti ? Quels ont été les points positifs et négatifs dans la prise en compte des nuisances (si prise en compte il y a eu...) ? Ont-ils des craintes pour l'installation du nouveau chantier ? Si oui, quelles sont-elles ?

Essayer de repérer, par ce questionnaire, dans le cas d'un quartier résidentiel, les personnes qui sont en permanence dans leur appartement comme les travailleurs à domicile où des personnes retraitées ou malades et, dans le cas d'immeubles de bureaux, leurs périodes d'activité.

Pour les personnes exerçant à l'extérieur, leurs horaires de retour chez eux. Ce questionnaire pourra être déposé dans une boite aux lettres installée à cet effet à l'emplacement du futur chantier mais il pourra être également accessible sur un serveur via internet. Afin d'augmenter les chances de réponses, l'anonymat pourra être respecté mais ne sera pas systématique. Cela sera à la convenance des intéressés.

Dans cette lettre d'information, il pourra être proposé une réunion d'information ou le voisinage sera convié afin qu'il lui soit présenté le futur chantier d'une manière plus précise avec ces différentes phases. Durant cette réunion, certaines interrogations résultantes du questionnaire, seront abordées avec des éléments de réponse concomitants. Il pourra être exposé également les dispositions particulières qui vont être mis en place afin de réduire au mieux les nuisances dues à l'activité de chantier. Un référent « nuisance » sera nommé par le maître d'œuvre. Il disposera d'un numéro de téléphone portable qui sera communiqué à l'assemblée afin qu'il puisse être joignable directement par le voisinage en cas de nécessité. Cette information pourra être également rappelée sur le serveur ainsi qu'à l'entrée du poste de garde du futur chantier.

La mise en place d'un écran électroluminescent orienté vers les habitations sera un bon moyen pour informer le voisinage, au jour le jour, de la nature des travaux entrepris et un code couleur de niveau sonore par ordre croissant vert/orange/rouge permettra de rappeler l'importance des niveaux sonores susceptibles de se produire au cours de la journée.

6-1-2 Etude acoustique et vibratoire :

Des mesures acoustiques de longue durée à proximité des zones qualifiées de sensibles ainsi que celles qui seront au plus proche du chantier permettront de déterminer le niveau de bruit résiduel, à savoir la moyenne du niveau sonore habituel du lieu avant toute activité de travaux.

Ce niveau de référence permettra d'évaluer, par prévision, l'impact du futur chantier sur l'environnement lorsque ce dernier sera en activité. En effet, en comparant l'évaluation des niveaux sonores du chantier dans ces différentes phases avec ce niveau résiduel, ceci permettra de mettre en évidence des émergences et d'évaluer le niveau de gêne qui pourra s'ensuivre et qu'il conviendra, éventuellement, de réduire.

Au niveau vibratoire, il est fortement conseillé au promoteur de réaliser ce que l'on appelle **un référé préventif**.

-Référé préventif :

Cette procédure a pour objet de faire constater, par un expert indépendant, l'état des immeubles avoisinants avant le commencement du futur chantier.

L'expert est désigné par le président du tribunal de grande instance du lieu de situation de l'immeuble statuant en référé. Les propriétaires des immeubles avoisinants (propriétaires de maisons, de terrains, ou syndicats de copropriétaires) reçoivent donc une assignation en référé qui leur est délivrée par huissier à la requête du promoteur et qui les convoque à une audience du tribunal avec un délai de préavis qui varie en général de 15 jours à un mois. Lorsqu'on reçoit une telle assignation, on peut se faire représenter par un avocat, se présenter seul ou ne pas se présenter à l'audience. Quoi que l'on fasse, l'expert est de toutes façons désigné, et convoquera toutes les parties à ses opérations d'expertise, même celles qui ne se sont pas présentées à l'audience.

La provision destinée à l'expert est à la charge de la partie demanderesse, c'est-à-dire en pratique du promoteur. Elle varie dans une fourchette qui va habituellement de 2 000 à 5 000€, en fonction de l'importance du programme. Si l'on peut éviter d'aller à l'audience, il est en revanche fortement conseillé d'être présent ou représenté lorsqu'on reçoit une convocation de l'expert à un rendez-vous d'expertise.

En effet, si l'on est absent, et que des désordres surviennent au cours des opérations de construction, on ne pourra plus arguer du bon état antérieur de sa propre construction.

Au cours des rendez-vous d'expertise, l'expert examinera l'état de tous les immeubles et appartements visités, et pourra revenir pendant la construction, si des désordres lui sont signalés.

Il est souhaitable de se faire assister par un avocat spécialisé pendant les opérations d'expertise, ce qui permettra d'avoir accès à toutes les pièces de construction, de faire noter par l'expert tout ce qui est important et d'avoir un accès facilité à l'expert en cas de désordres.

L'intérêt du référé préventif est, pour le promoteur, de prévenir autant que faire se peut, les contestations sur l'état des constructions avoisinantes avant et pendant le chantier. Pour les propriétaires voisins, l'intérêt est de faire constater l'état de sa propriété, et de pouvoir signaler à un expert indépendant tout désordre survenant pendant les opérations de démolition et de construction.

6-1-3 Choix du matériel de chantier :

Avec la nouvelle réglementation européenne sur les engins de chantier (voir §2-3-1), il est obligatoire de faire figurer de manière évidente et lisible leur niveau de puissance acoustique pondéré A. Cette donnée est précieuse puisqu'elle va permettre, d'une part, de comparer les différents engins entre eux et de pouvoir choisir, à puissance de couple de moteur égale, celui qui est le moins bruyant en puissance sonore.

Il faut quand même rappeler que d'autres facteurs entre en ligne de compte pour l'impact de l'activité d'un engin par rapport au voisinage et notamment le travail qui lui ait demandé.

Une étude entreprise par le service de M. Xavier CARNIEL, responsable des Actions Collectives au pôle « Ingénierie Bruit et Vibration » du CETIM de Senlis, a été réalisée sur des engins de chantiers. Cette étude étant confidentielle, il ne sera repris que le principe de l'expérience sans données chiffrées. Prenant l'exemple d'une grue à godet, des mesures acoustiques opérées par antennerie microphonique a permis de mettre en évidence, par algorithme de traitement du signal inverse, la localisation des différentes sources de bruit ainsi que ces niveaux sonores correspondant. Ainsi, il est possible de visualiser, par un traitement de couleur, les différents niveaux de sources sonores diffusées par l'activité de l'engin étudié. Il s'avère que l'origine du bruit maximal ne provenait pas de l'activité du moteur de l'engin mais du claquement du godet sur le bras de la grue lorsque ce dernier est utilisé sur son ouverture maximale.

Cette remarque permet de dire qu'une bonne connaissance du matériel et de son utilisation sont des données importantes qui seront à recueillir auprès des professionnels utilisateurs des engins concernés.

6-1-4 Planification des niveaux sonores des engins de chantier :

Connaissant les différentes phases du chantier et le matériel retenu, la prévision du niveau sonore et vibratoire peut être entreprise.

Sachant que pour chacune des phases de travaux correspond un nombre précis d'engins sur le chantier, il sera possible de calculer, suivant le type d'activité, un niveau sonore en périphérie selon la méthode préconisée en annexe 3.

C'est à ce moment ou une intervention est possible si les prévisions obtenues sont jugées trop élevées. Dans ce cas-là, deux cas de figures peuvent se présenter.

Le premier part du principe qu'il vaut mieux diffuser beaucoup de bruit mais sur une courte période plutôt que l'inverse. Sachant qu'en doublant le nombre d'engins sur le chantier, on ne fera qu'augmenter de 3 dB le niveau sonore global, doubler les effectifs pour une actions plus rapide peut être une solution mais qui doit être conditionnée comme on le verra au § 6-1-5.

Le second cas de figure est d'essayer de réduire le niveau sonore soit à la source soit sur le chemin de propagation (§4-1) afin d'obtenir une atténuation conséquente sur le lieu de réception.

Par ailleurs, il est à noter que d'autres travaux sur le chantier pourront être réalisés en parallèle en étant couvert par ceux qui sont les plus bruyants. Par exemple, une activité de 10 dB en dessous d'une autre plus bruyante n'aura aucun impact sur le niveau global du bruit mesuré sur le chantier.

C'est également pendant cette phase qu'il faudra s'attarder sur le plan d'implantation du matériel. Pour ce qui concerne les groupes compresseurs fixes, les placer le plus loin des habitations les plus sensibles et les entourer d'un écran acoustique si besoin est. Pour les baraquements de chantier type « Algeco », s'en servir comme écrans acoustiques « naturels » pour le voisinage. Eventuellement, lors de terrassement, les tas de déblais pourront être montés assez haut en direction des habitations pour produire également des écrans contre le bruit lors des travaux dans la fosse. Ce sont des opérations qui financièrement ne coutent rien et peuvent grandement améliorer la situation. Il existe sans doute d'autres aménagements possibles qui pourront être mis en place dans cet esprit et qui feront appels à l'imagination et l'ingéniosité des compagnons sur le site.

Pour ce qui concerne la prédiction vibratoire, il a été vu que deux types de travaux pouvaient être source de vibrations importantes : le compactage des sols et le fonçage de pieux. Des essais in situ seront donc nécessaires avec une source vibratoire du type marteau piqueur ou brise-roche afin de déterminer les niveaux de transmissions vibratoires du terrain et essayer d'évaluer les niveaux maxima à prévoir à proximité des habitations les plus exposés ou les plus sensibles suivant les différentes méthodes proposées en annexe 4. C'est à ce niveau de l'étude qu'il conviendra de prévoir la nécessité ou pas d'une isolation vibratoire comme vu au §4-2-2.

6-1-5 Organisation des transports de matériaux :

Pour l'évaluation des niveaux sonores des engins mobiles respectivement sur un terrain restreint et pour le transport précisé en annexe 3, que l'organisation des transports sur le site est importante pour une meilleure gestion des nuisances.

L'autre point à considérer qui n'a pas encore été abordé est relatif à l'utilisation obligatoire des alarmes de recul sur les engins de chantier et notamment les camions de transport pour l'apport de matériel ou pour le déblaiement. Ces niveaux sonores étant relativement élevé, éviter au mieux leur utilisation permettrait d'éviter des sources sonores supplémentaires. Ceci peut être possible en étudiant les accès au chantier au niveau de ses entrées et de ses sorties. L'étude du circuit emprunté par les engins devrait permettre de réaliser des demi-tours et d'éviter des marches-arrières inutiles.

Un point également important dans le traçage des accès est d'éviter au mieux l'emprunt des voies résidentielles.

6-1-6 Planification et organisation des horaires de chantier :

Connaissant les niveaux sonores prévus pendant les différentes phases de chantier, il conviendra de choisir, dans la mesure du possible, pour les travaux les plus bruyants, les horaires les moins gênants pour les riverains.

Ensuite, une sorte de diagramme de GANTT pourra être réalisé à plusieurs entrées. En abscisse il y aura le temps, en ordonnée le nom des entreprises et les travaux envisagés et sur le graphique, en troisième dimension, la puissance acoustique de l'activité qui sera suivie du calcul du niveau sonore à la distance x des habitations les plus exposées.

Puis, sur une journée, les différents niveaux sonores des différentes interventions sur le chantier pourront être sommés pour obtenir une estimation rapide du niveau général global prévisionnel. Cette estimation pourra être complétée de manière plus précise en utilisant les différentes techniques de calculs développées en annexe 3.

Tableau XVIII : Diagramme de Gantt des niveaux de puissances sonores des engins lors des différentes phases du chantier associés à l'évaluation primaire (sans termes correctifs, voir annexe 3) du niveau sonore global en un point x .

Activités sur le chantier	Semaine 23					Semaine 24					Semaine 25					Distance du point de mesure X par rapport à la source sonore (en mètres)	Niveau sonore équivalent LAeq (en dB(A)) au point X
	Lu	Ma	Me	Je	Ve	Lu	Ma	Me	Je	Ve	Lu	Ma	Me	Je	Ve		
Terrassement (société x)	L _{WA} =107 dB(A)															30	69,5
Déblaiement (société y)			L _{WA} =103 dB(A)													30	65,5
Compactage (société t)									L _{WA} =105 dB(A)							30	67,5
Battage de pieux au mouton pneumatique (Société z)									L _{WA} =125 dB(A)							50	83
Estimation primaire du niveau global au point de mesure x (en dB(A))	69,5		71			83	83	83	83								

Des périodes d'activité de chantier seront définis (Ex : 8H00-12H00 / 13H00 -17H00) et devront être respectées dans la mesure du possible sauf dérogation spéciale mais qui devra être anticipée avec information du voisinage en amont.

6-1-7 Formation, information et sensibilisation des compagnons :

Sur un chantier, le bruit peut être le résultat de mauvaises pratiques plus ou moins considérées comme normales sur un chantier. Entreprendre une sensibilisation sur les bruits de chantier auprès des compagnons que ce soit vis à vis d'eux-mêmes pour la protection de leur audition que pour le respect du voisinage proche serait une démarche qui permettrait de faire évoluer les pratiques dans le bon sens.

Cela peut être le cas des techniques de communication sur le site. Il n'est pas rare que certains ouvriers soient obligés de crier afin de se faire entendre par leurs collègues, au regard du bruit ambiant pratiqué sur le chantier. Mettre à disposition un système de talkie-walkie avec oreillettes et inciter à leur utilisation pourraient améliorer nettement la situation dans ce domaine.

Les manières de travailler également pourraient être revues afin qu'elles soient moins bruyantes. L'exemple évident est le déchargement de camion. Si les matériaux sont des poutres métalliques, les déposer sur le sol plutôt que de les laisser tomber d'une hauteur permettraient de réduire les niveaux en bruits d'impact.

Installer un revêtement caoutchouteux au niveau du pourtour des goulottes d'évacuation des gravats limiterait quelques peu le bruit produit par leur descente. Son extrémité basse donnant généralement sur une benne, le même traitement de ce réceptacle pourra se faire notamment soit par l'installation de pneus recyclés soit par l'installation d'un grillage au niveau du fond de la benne qui éviterait l'impact gravats/acier.

Toute idée ingénieuse allant dans ce sens sera à encourager et à développer.

6-1-8 Charte du chantier :

L'organisation planifiée avec les engins choisis, travaillant au bon endroit, aux jours et horaires arrêtés, devra être respectée par chacune des différentes entreprises retenues sur le chantier.

Pour ce faire, une charte rappelant cette réglementation devra être signée par chacun des intervenants. Pour appuyer et donner du poids à cet engagement, pour tout manquement à ses directives, un système d'amende sera à mettre en place dont le montant devra être suffisamment élevé afin que son rôle dissuasif soit opérant.

En effet, un règlement sans sanctions pour son irrespect ne sert à rien. Il est possible de le graduer. Par exemple, pour un dépassement d'horaire, il y a un premier avertissement de

l'entreprise mise en cause. Au deuxième dépassement, la sanction est directement applicable. A chaque organisateur de chantier de trouver le système le plus approprié pour que les bonnes dispositions de départ ne soient pas lettres mortes.

6-2 Surveillance pendant la durée du chantier.

6-2-1 Mise en place d'une surveillance acoustique et vibratoire :

Comme il a été vu dans la 5^{ème} partie de ce document, une surveillance acoustique et vibratoire peut être installée en périphérie d'un chantier. Un résumé de cette surveillance va être repris.

Elle consiste en la mise en place de stations de surveillance constituées d'un microphone et d'un accéléromètre respectivement pour la mesure des champs acoustiques et vibratoires. Ces signaux sont ensuite numérisés et transmis, via un modem, sur un serveur sur lequel les niveaux pratiqués sur le chantier sont enregistrés et consultables 7j/7 et 24H/24

Cette surveillance acoustique pourra fonctionner avec deux seuils : un seuil orange qui permettra de déterminer des activités de chantier en dehors des horaires de chantier. Lorsque le seuil est dépassé pendant plus de 2 minutes, un enregistrement audio est automatiquement réalisé afin de pouvoir déterminer la nature de la source sonore et permettre d'identifier l'entreprise éventuellement mise en cause.

Le second seuil sera nommé seuil rouge. Même principe que pour le seuil orange, dès qu'il est dépassé pendant plus de 2 minutes, que ce soit en dehors comme pendant les horaires de chantier, un enregistrement audio est également réalisé et couplé avec d'autres actions en simultané qui vont être décrites dans ce qui suit.

Tous d'abord, suite à l'alerte, un système de gyrophare se met automatiquement en activité sur le chantier.

Ensuite, le responsable du chantier et/ou le responsable « nuisance » reçoit un message directement sur son téléphone portable l'informant de la situation extrême, en instantané, afin qu'il puisse agir directement sur le chantier en localisant les sources responsables du dépassement et prendre les dispositions qui s'imposent pour en diminuer l'impact. Il serait nécessaire de mettre à sa disposition un sonomètre afin de localiser et mesurer les niveaux des sources en présence et déterminer qu'elles sont celles qui conviennent d'arrêter pour retrouver un niveau sonore qui revienne dans les normes inscrites dans le cahier des charges.

Les seuls seuils rouges qui ne seront pas pris en compte seront ceux enregistrés durant les périodes déclarées particulièrement bruyantes et qui auront fait l'objet d'une information préalable du voisinage.

Un système photographique ou vidéo couplé aux différents seuils orange et rouge, permettrait d'obtenir une information complémentaire afin de mieux comprendre les situations déclarées hors normes.

Un rapport mensuel retraçant les résultats de cette surveillance en précisant les écarts enregistrés ainsi que les entreprises mises en causes sera réalisé.

Il faudra également préciser les actions qui ont été mises en place suite à une alerte rouge et indiquer si les niveaux sonores ont pu repasser, suite à cette intervention, en dessous du niveau d'alerte.

La question de savoir si ce document sera consultable directement par les habitants du voisinage via le serveur internet est une question qui reste ouverte. Cependant, jouer la carte de la transparence est une politique qui peut être bien perçue et pourra, pour le voisinage, être un gage de confiance mutuelle et permettra une meilleure acceptation d'éventuels écarts.

6-2-2 Contrôle de l'efficacité des stations :

Par expérience, il s'avère que le matériel de surveillance mis en place peut être déficient. Il conviendra de surveiller, à son tour, le système de surveillance pour s'assurer de son bon fonctionnement et ce, régulièrement.

N'oublions pas que les données relevées ne peuvent être qu'un atout pour le chantier. Si des plaintes surgissent et que les relevés de la station ne sont pas accessibles suite à une avarie, les responsabilités ne pourront pas être partagées avec les véritables acteurs des nuisances. Par ailleurs, le sérieux dans la prise en charge des nuisances par le maître d'ouvrage pourra être particulièrement mis en cause si le système mis en place ne remplit pas son office.

6-2-3 Entretien d'une bonne communication :

Encore une fois, poursuivre une bonne communication avec le voisinage est un point essentiel. Organiser des réunions régulières, une fois par semaine en début de chantier pour la mise en place du système de surveillance, puis de manière plus espacée au regard de l'évolution de la situation et / ou du chantier, est important. Rester à l'écoute de leurs revendications, en tenir compte en apportant des solutions pouvant améliorer la situation, pourra se faire lors de ses assemblées. Faire le point sur la surveillance acoustique et vibratoire sur la période écoulée sera un geste de transparence qui ne pourra qu'être apprécié

et cela favorisera la mise en place d'une certaine confiance entre les deux parties prenantes concernées.

Le site web peut également être un lieu d'échange à partir du moment où chaque question ou intervention d'un tiers reçoit une réponse dans les jours qui suivent son envoi.

Une boîte aux lettres près du poste d'accueil du chantier, ou les habitants voisins pourront laisser des messages écrits, devra être mise en place. Ne pas oublier qu'avoir accès à internet n'est pas obligatoire et que certaines personnes, ne disposant pas de cet outil, doivent pouvoir également s'exprimer et se faire entendre.

Veiller à respecter l'information préalable du voisinage (au moins une semaine à l'avance) par courrier individuel dans chaque boîte aux lettres, pour des périodes de chantier particulièrement bruyantes, est impératif. Cette information, comme toutes les autres, pourra être relayée sur le site web.

6-3 Clôture du chantier :

La fin d'un chantier est souvent la période oubliée dans la prise en compte des nuisances.

Au même titre que la pratique de la réception d'un chantier entraîne des contrôles pour s'assurer si les normes demandées dans le cahier des charges ont bien été respectées, la même opération pour le cahier des charges relatif aux nuisances pourrait être réalisée.

Cette pratique a l'avantage de faire le bilan, en interne, sur les points forts et faibles du projet dans ce domaine.

Par ailleurs, la différence notable d'avec la réception de chantier sera que les résultats devront également tenir compte de l'avis du voisinage qui reste, au final, le principal intéressé. Pour ce faire, les résultats de cette analyse devront leur être présentés lors d'une réunion commune afin de recevoir les critiques positives et négatives qui s'ensuivront inévitablement.

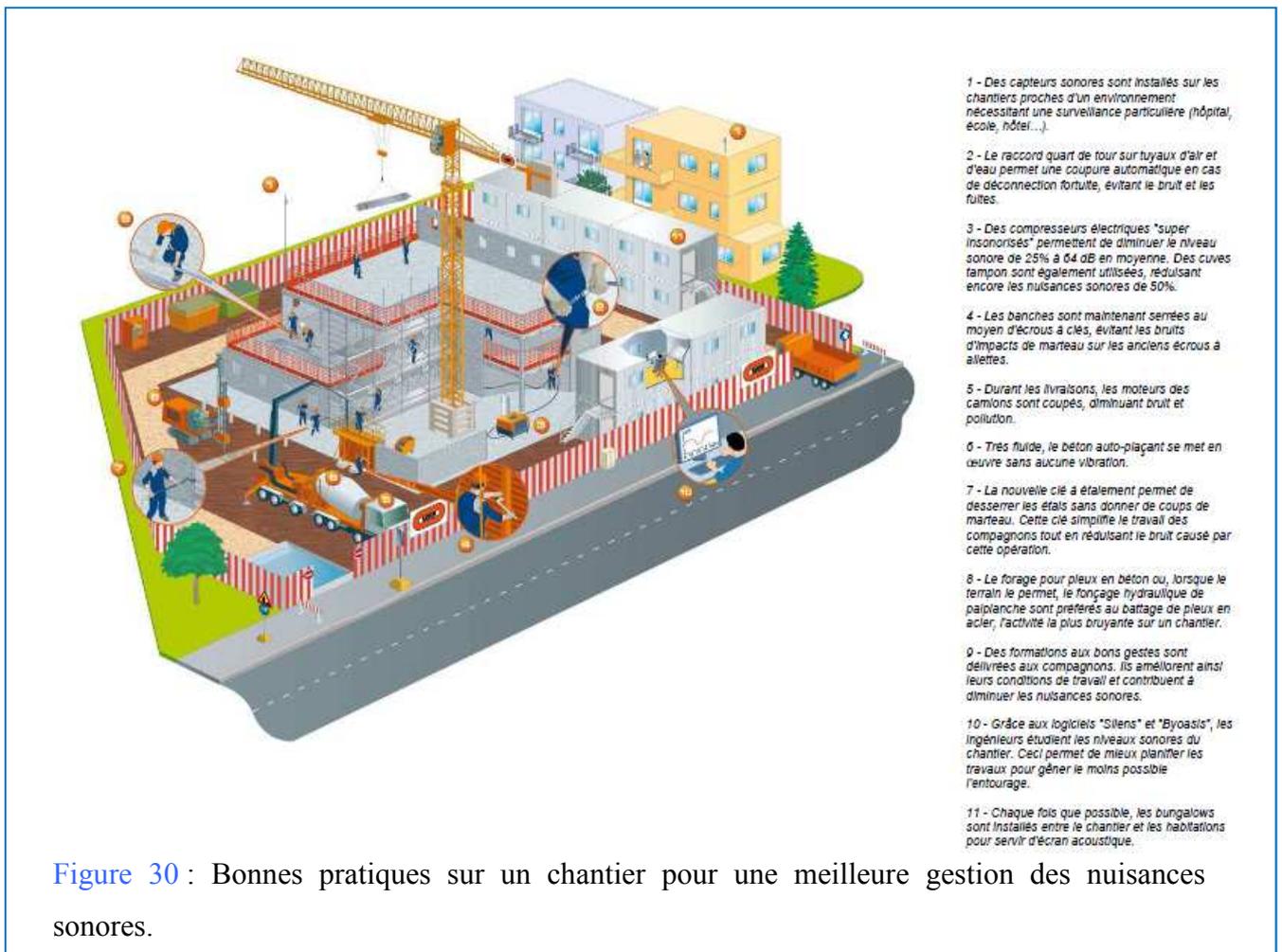
L'avantage de cette pratique est de synthétiser les bonnes techniques validées par le voisinage ainsi que celles qui ont moins bien ou pas du tout fonctionnées au regard d'une configuration de travaux particulière.

L'idéal serait de pouvoir recueillir et partager ces différentes expériences avec les autres entreprises de construction afin que chaque projet puisse bénéficier de ces acquis et enrichir, à son tour, la banque de données dans ce domaine.

Un site internet à l'initiative d'un organisme officiel du type ministériel, serait à mettre en place avec des propositions incitatives pour favoriser la participation des entrepreneurs. Elles pourront être du type donnant/donnant à savoir que l'accès aux informations du site ne pourra se faire qu'après engagement de l'entreprise de la rédaction et de la communication d'un rapport final de gestion des nuisances de leur propre chantier.

CONCLUSIONS :

La figure reproduite ci-dessous résume assez bien les bonnes pratiques à mettre en place sur un chantier.



Par ailleurs, il est à préciser qu'à partir du moment où tout ce qui est techniquement possible de mettre en place pour réduire les nuisances, que ce soit au niveau organisation des phases de chantiers, qu'en moyens de protections acoustiques et vibratoires installées, que ces efforts sont présentés et expliqués au voisinage, il y a de forte probabilité pour que le chantier puisse se réaliser sans encombre.

Maintenant, quand une période du chantier s'avèrera particulièrement bruyante et, qu'en raison du contexte, il n'y a pas de possibilité de pouvoir améliorer la situation, prévenir le voisinage en amont afin qu'il puisse éventuellement organiser sa journée pour ne pas être

présent à son domicile, est une question de bon sens. Pour ceux qui ne pourront pas bouger de chez eux, ils se seront préparés psychologiquement à cette journée et, du fait de ne pas avoir été mis devant le fait accompli, seront plus à même d'accepter cette situation imposée.

Insister sur une bonne communication pour une meilleure gestion des nuisances est un point important qui devra, au fil du temps, entrer dans les pratiques habituelles d'organisation de chantier au même titre que les procédures de sécurité à mettre en place pour la protection du compagnon sur le site.

● Dans cette dernière partie, il a été précisé différents points qui devraient permettre, si ils sont suivis, une meilleure gestion des nuisances sonores et vibratoires d'un chantier. Bien que cette analyse se veuille exhaustive, elle restera incomplète puisque chaque chantier étant, par nature, particulier, il demandera toujours d'adapter des solutions aux problèmes rencontrés et de faire preuve d'inventivité et d'imagination pour en améliorer leur efficacité. Cependant, dans la pratique, combien de maîtres d'ouvrage sont prêts à investir et à s'investir dans cette voie de la prévention ? N'y aurait-il pas de nouvelles pistes à défricher pour inciter les responsables de chantier à se sentir plus concernés par cette problématique ? La conclusion, qui va suivre, va s'essayer dans ce sens.

Conclusions générales:

L'activité de chantier se retrouve dans toute grande métropole en constante évolution, dans un tissu urbain de plus en plus dense. Le problème des nuisances sonores et vibratoires qu'ils peuvent engendrer sur le voisinage proche reste une question d'actualité.

L'enjeu est de protéger le voisinage sans compromettre l'évolution urbaine nécessaire à toute ville et qui s'exprime par de la rénovation, de la démolition ou de la construction de bâtiments.

Pour aborder ce sujet, il a été rappelé, dans un premier temps, quelques bases de la physique de l'acoustique et des vibrations.

Dans un second temps, il a été passé en revue tout ce qui est réglementation et normalisation qui touchent de près ou de loin les nuisances sonores et vibratoires afin de chercher des éléments concrets sur lesquels il serait possible de s'appuyer pour une meilleure gestion des chantiers. Cette étude révèle qu'actuellement il n'existe aucun texte édictant des normes acoustiques ou vibratoires obligatoires à respecter pour une activité de chantier dans le cadre de la protection du voisinage.

La question qui reste posée est comment gérer au mieux les nuisances sonores et vibratoires rencontrées sur un chantier.

Pour commencer à répondre à cette interrogation, une description succincte des différentes étapes d'un chantier a été opérée afin de mieux comprendre son déroulement dans le temps.

Ensuite, différentes méthodes d'isolation acoustique et vibratoire ont été présentées pour en réduire l'impact sur le voisinage proche.

Enfin, une procédure précisant les différentes étapes à suivre pour une meilleure gestion de ce type de nuisance sur un chantier a été proposée.

De cette étude, il ressort que les nuisances sonores et vibratoires ne sont pas une fatalité. Il y a possibilité de mettre en place un plan prévisionnel traitant en amont l'impact du futur chantier et dans lequel un grand effort de communication avec le voisinage sera à favoriser. Faire connaître auprès du public concerné, le but et l'intérêt de la réalisation des travaux, les impératifs du chantier, les mesures prises pour en réduire l'impact ainsi que les limites techniques de protection inhérentes à certaines activités, est une reconnaissance explicite de la gêne qu'il devra subir malgré les mesures mises en place. Cette attitude peut se traduire par

une certaine forme de respect. Le fait de ne pas mettre le voisinage devant le « fait accompli » lui permet de mieux accepter une situation qu'il n'a pas choisie.

Cependant, il faut reconnaître que certains chantiers enclavés seront plus difficiles à gérer par rapport à ceux non mitoyens de murs d'habitation. Mais il reste toujours des mesures à prendre pour améliorer une situation que ce soit dans son organisation ou dans les moyens utiliser pour en réduire la durée.

Par ailleurs, cet intérêt de l'entrepreneur pour la gestion des nuisances sonores et vibratoires commence à se faire sentir mais n'est pas encore devenu un réflexe dans la profession.

Le problème subsiste lorsque la vie d'un riverain est devenue impossible et qu'il souhaite se faire entendre auprès du responsable des nuisances.

En effet, certaines grandes entreprises, disposant de cabinets juridiques conséquents, n'hésitent pas, lors de poursuites auprès de tribunaux civils, d'utiliser tous les artifices légaux mis à leur disposition pour retarder la procédure jusqu'à la fin des travaux pour que le jugement ne puisse avoir lieu suite à la disparition de la source de discorde.

Dans ce cas précis, qui est loin d'être isolé, la solution avant d'être acoustique ou vibratoire, est avant tout une question de volonté de l'entrepreneur. Comment susciter cette volonté ?

Je pense qu'il faudrait trouver un processus plus systématique et efficace. Je proposerais que, comme la loi oblige l'obtention d'un permis de construire pour tout travaux d'envergures dont la durée serait un des facteurs importants à retenir, il serait judicieux que le Maire, lorsque la situation l'exige, notamment dans un secteur urbain dont le risque d'impact sur le voisinage est évident, que soit inclus obligatoirement, dans le cahier des charges de tout projet de construction publique ou privé, la production d'une étude d'impact acoustique et vibratoire sur l'environnement. Au même titre que l'instruction d'une plainte est soumise à un juge, cette étude serait ensuite soumise à une structure indépendante constituée d'experts qui donnerait son avis sur la pertinence, l'efficacité et la suffisance des propositions faites pour limiter ses nuisances sur l'environnement au regard du contexte des travaux. Cette assemblée pourrait également être source de propositions pour compléter l'étude si elle le juge utile.

Je reste persuadé que la solution doit être réglementaire au niveau des autorisations de travaux pour une meilleure gestion des nuisances sonores et vibratoire des futurs chantiers et amoindrir ainsi les inégalités de traitement des nuisances qui subsistent encore dans ce domaine au niveau des commanditaires des chantiers.

ANNEXES

A1 Vibrations induites dans les sols :

Dans les sols, on distingue deux grands groupes d'onde :

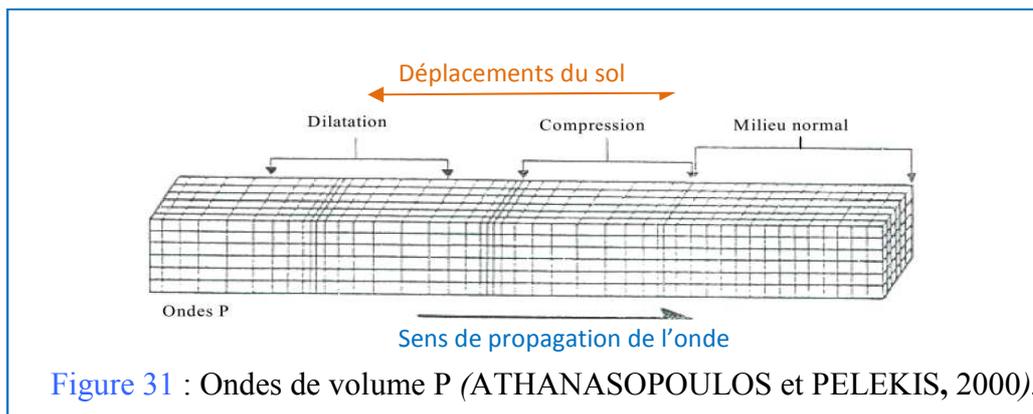
- les ondes de volume
- les ondes de surface

A-1-1 Les ondes de volume :

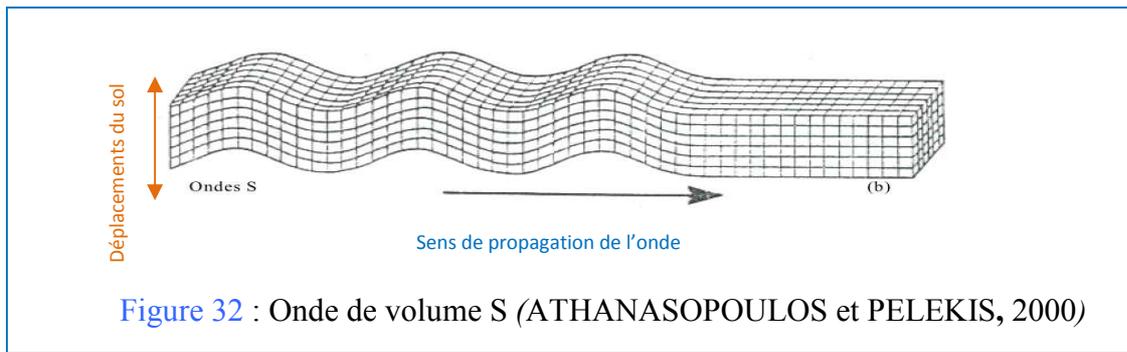
Les ondes de volume se propagent à l'intérieur du sol ou le long de sa surface. Leur vitesse de propagation dépend de la nature du sol, donc des matériaux traversés et, de manière générale, augmente avec la profondeur.

On distingue deux types d'onde de volume :

- Les ondes P : également appelées ondes primaires. Ce sont des ondes de compression longitudinales. Le déplacement du sol, qui accompagne leur passage, se fait par dilatation et compression successives, parallèle à la direction de propagation de l'onde. Ce sont les ondes les plus rapides ($c_p = 6 \text{ Km.s}^{-1}$). Elles sont appelées primaires car, lors d'un séisme, ce sont les premières à être enregistrées sur le sismographe. Cette dénomination leur est restée même si la source vibratoire est autre qu'un tremblement de terre.



- Les ondes S : également appelées ondes secondaires, sont des ondes de cisaillement, appelée également ondes transversales. A leur passage, les mouvements du sol s'effectuent perpendiculairement au sens de propagation de l'onde, dans sa direction verticale. Elles sont moins rapides que les ondes P ($c_s = 4,06 \text{ Km.s}^{-1}$).



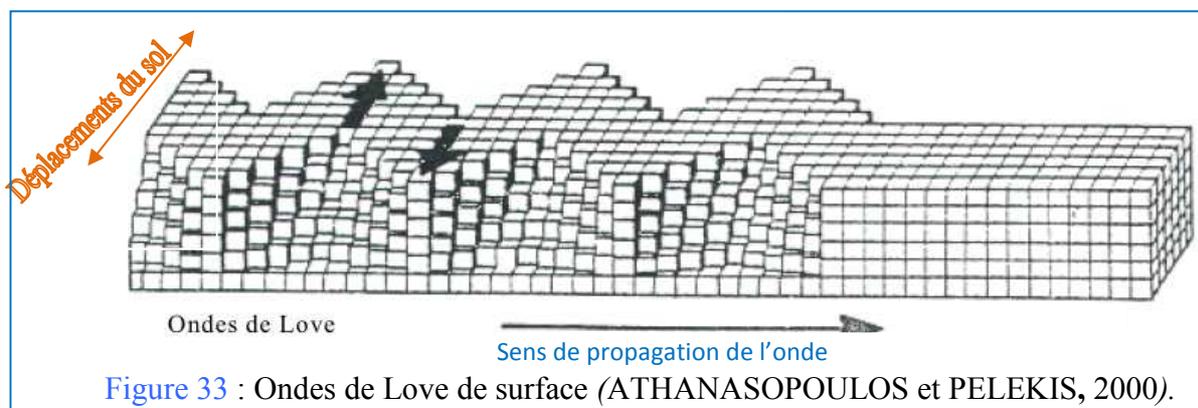
Aux ondes de volume, on peut appliquer la propagation acoustique géométrique ou du lancer de rayon, qui reprend la méthode de propagation du rayon lumineux. Les ondes de volume peuvent donc être réfléchies lors de la rencontre d'un obstacle, ou réfractées c'est-à-dire déviées à chaque changement de milieu d'impédance différente. Elles peuvent ainsi suivre des trajets très complexes à l'intérieur du sol ce qui rend difficile leur estimation en terme de prévision.

A-1-2 Les ondes de surface :

Les ondes de surfaces sont des ondes guidées par la surface du sol. Leur effet est comparable aux rides formées à la surface de l'eau d'un lac. Elles sont moins rapides que les ondes de volume mais leur amplitude est généralement plus forte.

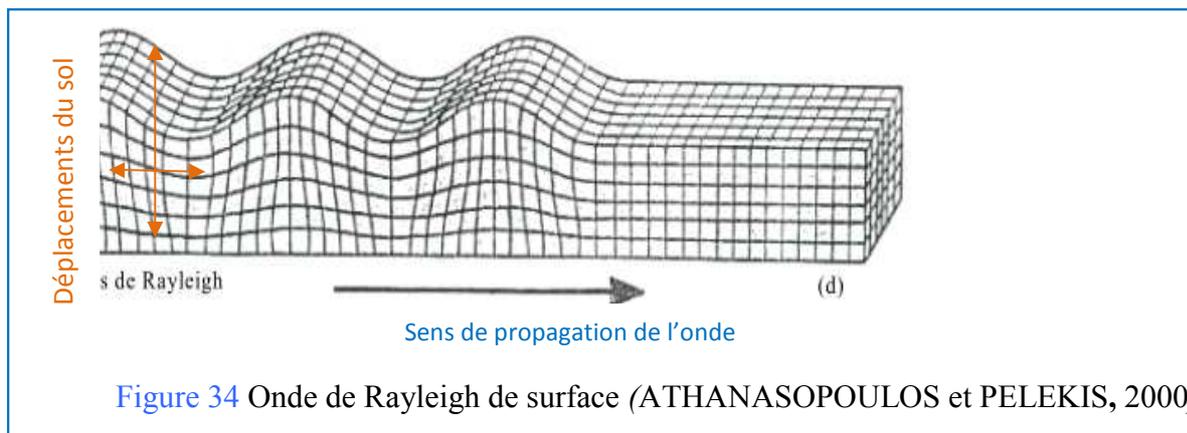
On distingue également deux types d'onde de surface :

- Les ondes de Love : elles ressemblent aux ondes S dans leur déplacement, à savoir que le sol se déplace perpendiculairement au sens de propagation mais dans sa direction horizontale et non verticale. Elles provoquent donc un ébranlement horizontal qui est la cause de dégâts au niveau des fondations des édifices. Ce type d'onde se diffuse essentiellement dans des sols hétérogènes stratifiés.



- Ondes de Rayleigh, beaucoup plus complexe et chaotiques puisqu'elles se déplacent aussi bien dans les sens horizontal que vertical (type elliptique) par rapport au sens de propagation

de l'onde. Dans un sol homogène (ce qui n'est pas toujours le cas dans la réalité), ce sont les seules ondes de surface à se produire.



A2 Rappel de physique des forces (ou contraintes)

Répartir une force sur une surface, c'est exercer une pression (DE NEHOUS) :

$$\text{Pression (en Pascal)} = \frac{\text{Force (en Newton)}}{\text{Surface(en m}^2\text{)}}$$

La capacité portante du sol doit donc être supérieure à la pression exercée par les fondations.

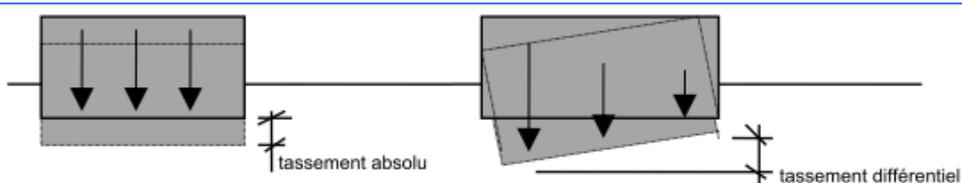
Une étude géologique préalable est donc nécessaire.

Elle permettra de définir quel type de fondation il conviendra de mettre en place.

Si cette étude n'est pas correctement faite, des phénomènes de tassements peuvent se produire et devenir particulièrement dangereux pour l'avenir de l'édifice en termes de stabilité et d'intégrité du bâtiment.

Les tassements les plus couramment rencontrés sont de deux types :

- tassement absolu
- tassement différentiel



a-Le tassement absolu d'un bâtiment, s'il est limité, n'engendre pas de désordres importants aux bâtiments

b-Le tassement différentiel d'un bâtiment engendre toujours de graves désordres.

Figure 35 : Différents types de tassement de terrain (DE NEHOUS).

Donc, au regard des contraintes de stabilité de l'édifice, deux types de fondation sont possibles :

- les fondations superficielles
- Les fondations profondes

A3 Méthodes prévisionnelles d'évaluation des nuisances sonores dans un projet de chantier

A-3-1 Prédiction des niveaux de puissance acoustique in situ des engins de chantiers :

A-3-1-1- Relation entre la puissance d'homologation et la puissance in situ :

Au regard de la réglementation applicable sur les engins de chantier vue au §2-3-1, il y a obligation pour leur mise sur le marché européen, d'indiquer clairement sur la machine, sa puissance acoustique L_W en dB(A) noté L_{WA} .

Les conditions d'homologation se réfèrent aux normes NF EN ISO 3744 et NF EN ISO 3746. Elles précisent que les mesures doivent être réalisées sur un sol réfléchissant avec un régime moteur proche de sa puissance maximale.

Or, ces conditions de fonctionnement lors de cette homologation sont rarement celles rencontrées sur un chantier. Une note technique du Ministère de l'Environnement (MERIEL, 2000) reprend cette problématique et donne quelques pistes pour trouver une relation entre la puissance d'homologation, qui sera notée dans ce document L_{WAh} , et la puissance mesurée « in situ » notée $L_{WA, in situ}$.

L'hypothèse de travail est de prendre en compte différents critères qui peuvent influencer le régime moteur et donc le niveau de puissance acoustique délivré par la machine lors de son activité sur le site.

Les familles d'engins étudiées sont celles qui se retrouvent communément sur un chantier à savoir :

- les pelleteuses,
- les bouteurs
- Les chargeuses pelleteuses

Cette étude ne recouvre donc pas tous les machines qu'il est possible de trouver sur un chantier Cependant elle permet de se faire une idée sur des corrections applicables sur des puissances L_{WAh} annoncées au regard de leur activité sur site.

A-3-1-2 Définition des termes correctifs :

Un engin de chantier, suivant la nature du **travail** qui lui sera demandé, va utiliser plus ou moins de la puissance de son moteur. Pour tenir compte de ce phénomène, il a été créé un terme correctif référencé sous le terme $C_{Travail} = C_T$.

Par exemple, pour une pelleuse, l'ouverture d'une tranchée sans chargement ou avec chargement de camion donnera un C_T différent. L'homologation étant réalisée avec une puissance du moteur maximale, ce terme correctif sera négatif. Il jouera donc un rôle d'atténuateur. Les tests ont donné un écart compris entre $-5\text{dB(A)} \leq C_T \leq -1 \text{ dB(A)}$.

La nature du **sol**, plus ou moins réfléchissant, aura également un impact sur la mesure du niveau de puissance de l'appareil. Ce nouveau terme correctif est nommé $C_{Sol} = C_s$. L'homologation réclame un sol réfléchissant pour les mesures. Ce terme correctif sera donc nul pour un sol réfléchissant et négatif et donc atténuateur pour des sols plus ou moins absorbants. Les tests ont donné une variation comprise entre $-2\text{dB(A)} \leq C_s \leq 0 \text{ dB(A)}$.

Enfin, le régime moteur sera également influencé par la consistance du **matériau** travaillé. Un dernier terme correcteur a donc été créé sous le terme $C_{Matériaux} = C_M$ qui aura un effet amplificateur sur le régime moteur. La variation se situe entre : $+1\text{dB(A)} \leq C_M \leq +8 \text{ dB(A)}$.

Un tableau récapitulatif de cette étude est présenté ci-dessous.

Tableau XIX : Tableau récapitulatif des termes correctifs applicables pour le calcul de la puissance acoustique L_{WA} in situ de certains engins de chantier

Engin	Définition	Formule	Corrections du niveau de puissance L_{WAH}			Pourcentage de réussite pour la validation de l'estimation à (+/-) 2 dB(A)	Pourcentage de réussite pour la validation de l'estimation à (+/-) 3 dB(A)
			Termes correctifs	Niveau de correction en dB(A)	Condition de mesure		
 Pelleteuse : 123 échantillons	Engin automoteur sur pneumatiques ou sur chenilles qui permet de creuser, de déplacer et de décharger des matériaux au moyen du godet fixé à une flèche	$L_{WA, in situ} = L_{WAh} + C_T + C_M + C_S$	Type de travail effectué C_T	-2	Ouverture de tranchée sans chargement de camion	64,7 %	77%
				-2	Nivellement avec godet en surface		
				-1	Ouverture de tranchée avec chargement de camion		
			Nature des matériaux mis en œuvre C_M	+4	Terre végétale		
				+4	Tout venant		
				+7	Matériaux durs (roches, gravats, bitume)		
			Nature du Sol C_S	-2	Sol absorbant		
				-1	Sol semi réfléchissant		
				0	Sol réfléchissant		
 Buteur : 41 échantillons	Machine automotrice sur chenilles ou sur pneumatiques servant à pousser ou à tirer à l'aide d'un outil	$L_{WA, in situ} = L_{WAh} + C_M + C_S$	Nature des matériaux mis en œuvre C_M	+5	Terre végétale	53,7 %	53,7%
				+3,5	Tout venant		
				+8	Matériaux durs (roches, gravats, bitume)		
			Nature du Sol C_S	-2	Sol absorbant		
				-1	Sol semi réfléchissant		
				0	Sol réfléchissant		
 Chargeuse – pelleteuse : 28 échantillon	Engin automoteur sur chenille ou pneumatique dont la structure portante principale est conçue pour recevoir d'origine un godet de chargeuse à l'avant et une pelle rétro à l'arrière.	$L_{WA, in situ} = L_{WAh} + C_T + C_M + C_S$	Type de travail effectué C_T	-2	Ouverture de tranchée sans chargement de camion	64,3%	71,4 %
				-5	Nivellement avec godet en surface		
				-3	Ouverture de tranchée avec chargement de camion		
			Nature des matériaux mis en œuvre C_M	+1	Terre végétale		
				+1	Tout venant		
				+3	Matériaux durs (roches, gravats, bitume)		
			Nature du Sol C_S	-2	Sol absorbant		
				-1	Sol semi réfléchissant		
				0	Sol réfléchissant		

A-3-1-3 Analyse critique des résultats :

Cette étude date de mai 2000, depuis, les niveaux sonores d'homologation sont plus stricts. Ceci est notamment le cas pour les bouteurs et les chargeuses pelleteuses dont le niveau de puissance acoustique à respecter a été diminué de 3 dB(A) par arrêté du 22 mai 2006 en application de la directive européenne 2005/88/CE.

Cependant, les formulations restent cohérentes puisque les termes correctifs dépendent du régime moteur de l'engin dans différentes configurations d'exécution de travaux.

A titre d'exemple, cette éventualité d'évolution des réglementations en la matière a été entrevue notamment **pour les bouteurs**. Une réévaluation des niveaux de puissance avait été estimée pour une diminution de 6 dB(A) du L_{WAh} . Les nouveaux calculs des pourcentages de réussite pour la validation de l'estimation passaient de 53,7 % à 70 % pour une marge d'erreur de +/- 2 dB(A). Donc les estimations, suite à cette nouvelle réglementation, ne sont donc que statistiquement plus confortables.

Par ailleurs, il apparaît globalement qu'avec les termes correctifs proposés et pour une incertitude de réussite de +/- 3 dB(A), les relations entre les puissances acoustiques d'homologation et celles relevées in situ sont vérifiées pour plus des trois quarts des matériels pelleteuses et chargeuses pelleteuses. Seuls, les bouteurs ont des résultats moins performants.

Il est donc possible de réaliser, à partir des valeurs d'homologations des familles d'engins étudiées, à savoir pelleteuses, chargeuses pelleteuses et bouteurs, un point de départ pour des études prévisionnelles de bruits des chantiers en tenant compte de la configuration et de la réalité du terrain.

A-3- 2 Méthode normalisée de calcul des niveaux de bruit des engins chantier par rapport au voisinage proche.

Cette étude provient d'une norme anglaise, la BS 5228 intitulée « Code of practice for noise and vibration control on construction and open sites » de 2009, dans sa partie 1 : « Noise ». Elle s'applique pour les chantiers ouverts, est n'est donc pas forcément bien adaptée pour ceux qui sont enclavés dans le tissu urbain.

Cependant, le point intéressant dans cette norme, est la procédure mise en place afin de produire une estimation du niveau sonore de l'activité des travaux au regard des différentes phases du chantier.

Elle divise l'activité des engins en deux catégories : celle que l'on qualifiera de type statique et celle que l'on nommera de type mobile.

La catégorie d'activités statiques correspondra aux installations qui sont parquées dans un endroit du site. C'est le cas par exemple des groupes électrogènes ou des moteurs compresseurs.

L'activité de type mobile se divise en deux ordres. Le premier correspond à celle qui s'opère sur un périmètre restreint. Cela peut être le cas par exemple des engins utilisés pour le déblaiement et qui transportent de la matière d'un endroit du chantier à un autre. Le second se rapportera à une activité de transport de matériaux qui viendrait de l'extérieur du site vers l'intérieur et vice et versa.

Cette typologie est mise en place au regard de la nature des sources sonores qui seront considérées comme ponctuelles dans le premier cas et comme mobiles dans le second.

Deux méthodes d'évaluation vont donc être développées en tenant compte de cette typologie.

A-3-2-1 Méthode d'évaluation pour les activités de chantier de type statique :

Elle se déroule en 6 étapes.

Etape S₁ : Obtention de la puissance L_{WA} de l'engin.

Depuis la nouvelle réglementation européenne touchant notamment aux engins de chantier, cette donnée de puissance acoustique est maintenant obligatoire et doit être affichée sur une plaque fixée sur l'engin considéré. Il a été précisée antérieurement que ces données sont à prendre avec circonspection puisque les conditions de mesure de cette puissance acoustique relève de contingences particulières. En effet, il faut rappeler que lors des essais en laboratoire pour la détermination de ces niveaux de puissance acoustique réglementaires, les moteurs sont testés à leur puissance maximale. Or, sur un chantier, le moteur n'est pas toujours utilisé à plein régime.

L'autre moyen, autre que la puissance affichée, d'obtenir une donnée plus adaptée au site ainsi qu'au mode d'utilisation de l'engin, est de réaliser une mesure in situ du LA_{eq} de son activité à une distance $R= 10$ mètres.

Avec cette mesure, il va être possible de retrouver son niveau de puissance en utilisant la formulation suivante :

$$LA_{eq} = L_{WA} + 10\text{Log}_{10}(Q) - 10\text{Log}_{10}(4\pi R^2)$$

$$L_{WA} = LA_{eq} - 10\text{Log}_{10}(Q) + 10\text{Log}_{10}(4\pi R^2)$$

Avec Q : facteur de directivité. L'énergie acoustique se diffusant sur une demi-sphère, le facteur de directivité est de 2 (Voir §1-2-1).

$4\pi R^2$: superficie de la sphère de propagation de l'énergie sonore avec

$R=10$ mètres

$$L_{WA} = LA_{eq} - 10\text{Log}_{10}(Q) + 10\text{Log}_{10}(4\pi) + 20\text{Log}_{10}(R)$$

$$L_{WA} = LA_{eq} - 10 \log_{10}(2) + 10 \log_{10}(12,56) + 20 \log_{10}(10)$$

$$L_{WA} = LA_{eq} (10 \text{ mètres}) + 28 \text{ dB(A)}$$

Eq A3-1

Etape S₂ : Mesurer la distance R entre l'engin et le point de mesure.

Etape S₃ : Calcul du terme correctif K' relatif à la distance R et à la nature du terrain.

Ce terme est relatif à la distance R entre la source sonore et le point de mesure. Il tient compte de la nature plus ou moins compacte du terrain sur lequel les ondes sonores vont se réfléchir pour atteindre le point de mesure. Deux types de terrain entrent dans la modélisation. Un terrain dure, donc très réfléchissant, repéré par la lettre K'_H (H pour « Hard ») et un terrain plus absorbant noté par la lettre K'_S (S pour « Soft »).

Ce terme sera également à retrancher du niveau de puissance L_{WA} pour le calcul du LA_{eq} à la distance R entre la source et le point de mesure.

Si la distance $R \geq 25$ mètres, les formulations suivantes sont applicables :

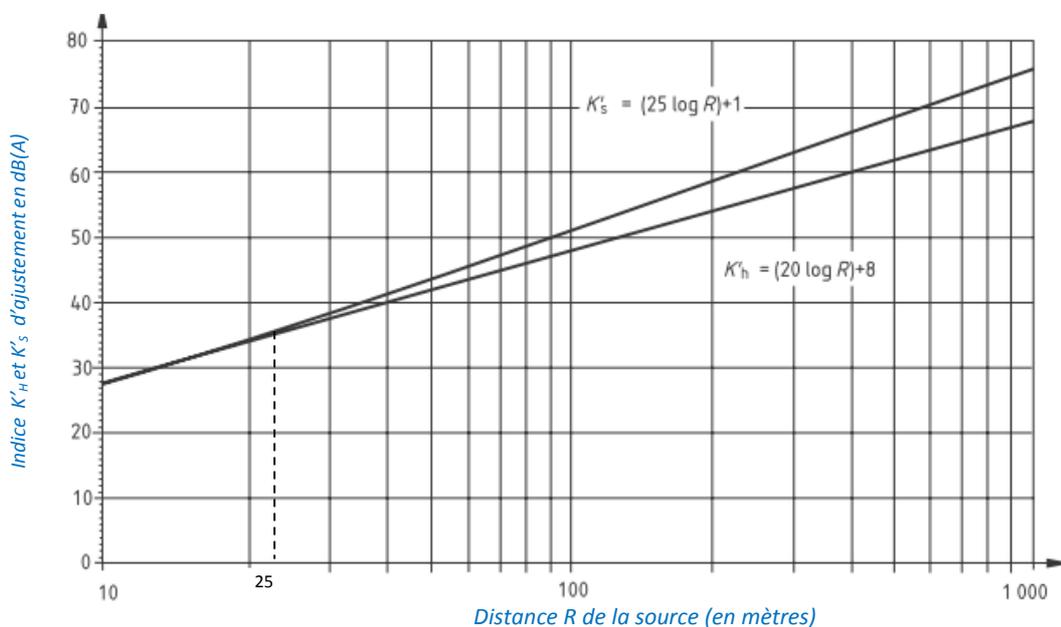
$$K'_H(R) = 20 \log_{10}(R) + 8$$

$$K'_S(R) = 25 \log_{10}(R) + 1$$

Eq A3-2

Si la distance $R < 25$ mètres, il conviendra d'utiliser l'abaque suivant :

Tableau XX : Abaque précisant l'indice d'ajustement K'_H et K'_S à soustraire du niveau L_{WA} pour le calcul du LA_{eq}. (BS 5228-1, 2009).



Si le terrain est mixte, à savoir X% de sol absorbant par rapport au sol réfléchissant, le terme correctif K' devient :

$$K'_M(R) = (1 - X\%)K'_H(R) + X\% K'_S(R)$$

$$K'_M(R) = K_H(R) + X\% [K_S(R) - K_H(R)]$$

Eq A3-3

Remarque 1 : Pour un sol mou, si le point de réception ou d'émission est situé à une hauteur au-delà de 2,5 mètres du sol, il faut recalculer l'indice d'affaiblissement K'_S . Il faut soustraire 15 mètres à la distance R et prendre le point correspondant de la courbe K'_H .

Exemple : L'engin de chantier est situé sur un sol mou à 110 mètres à l'horizontal du point de réception, ce dernier se trouvant lui-même à 4 mètres au-dessus du sol. La nouvelle distance est $R' = 110 - 15 = 95$ mètres. Nous reprenons l'équation correspondante à la courbe K'_H . L'indice d'ajustement devient : $20\text{Log}_{10}(95) + 8 = 47,5 \text{ dB(A)}$ au lieu de $25\text{Log}_{10}(110) + 1 = 52 \text{ dB(A)}$, donc un différentiel de $4,5 \text{ dB(A)}$ par rapport à un même point de mesure situé à moins de 2,5 mètres du sol.

Remarque 2 : Si la distance R va au-delà de 300 mètres, il faut prendre les courbes d'atténuation avec prudence car les phénomènes météorologiques (direction et force des vents, températures...) peuvent commencer à produire leurs effets sur la propagation de l'onde sonore.

Étape S4 : Vérifier si un écran (obstacle naturel ou artificiel) se trouve sur le chemin de propagation de l'onde sonore. Dans ce cas, il faut calculer le niveau d'atténuation qu'il va apporter sur la propagation du signal.

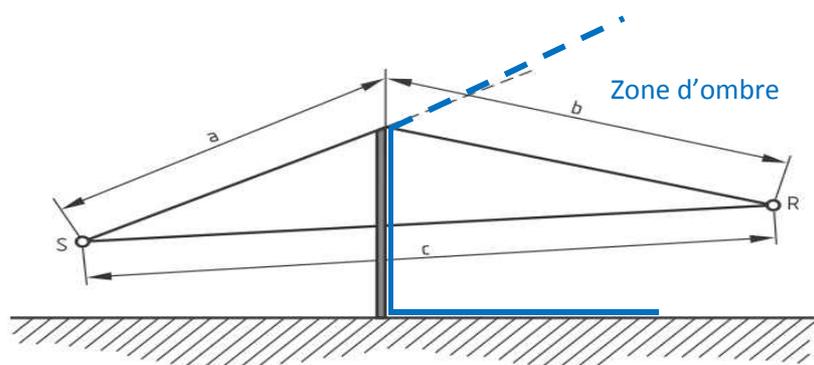


Figure 36 : Plan d'une barrière sur lequel figurent les distances a, b, et c pour le calcul du nombre de Fresnel N (BS 5228-1, 2009).

Calcul de l'atténuation due à l'écran :

La méthode consiste, dans un premier temps à calculer le nombre de Fresnel N. Il dépend de la longueur d'onde λ et des différents trajets que va emprunter l'onde sonore entre le point d'émission, l'obstacle et le point de réception. Il est défini par l'équation suivante :

$$N(\lambda) = \frac{2(a+b-c)}{\lambda}$$

Eq A3-4

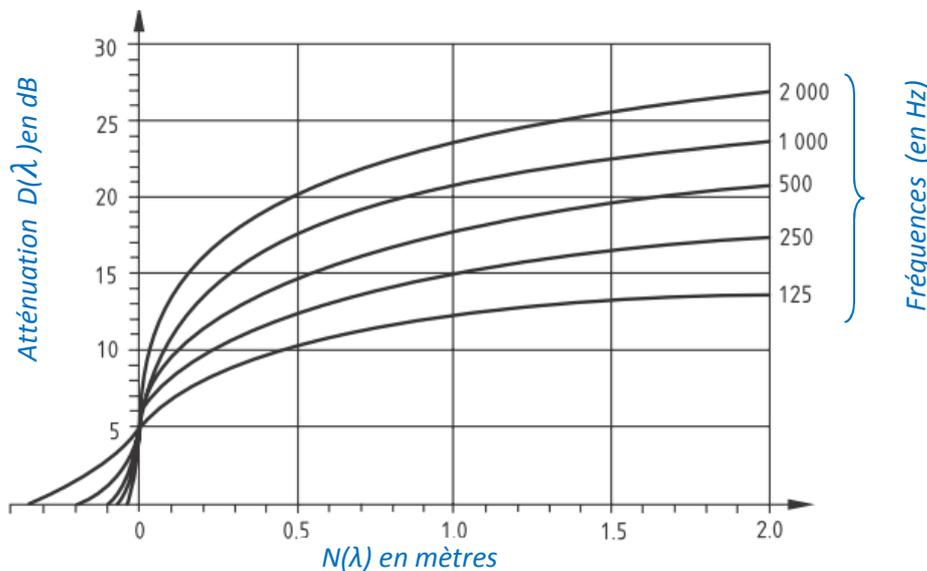
Pour $N(\lambda) \geq 1$, l'atténuation D de l'écran se calcule par la formule suivante :

$$D(\lambda) = 10 \text{Log}_{10}(20N(\lambda))$$

Eq A3-5

Pour $N < 1$, l'atténuation est notamment consultable sur le tableau XXI.

Tableau XXI : Niveaux d'atténuation acoustique de la barrière à différentes fréquences par rapport au nombre de Fresnel $N(\lambda)$ (BS 5228-1, 2009).



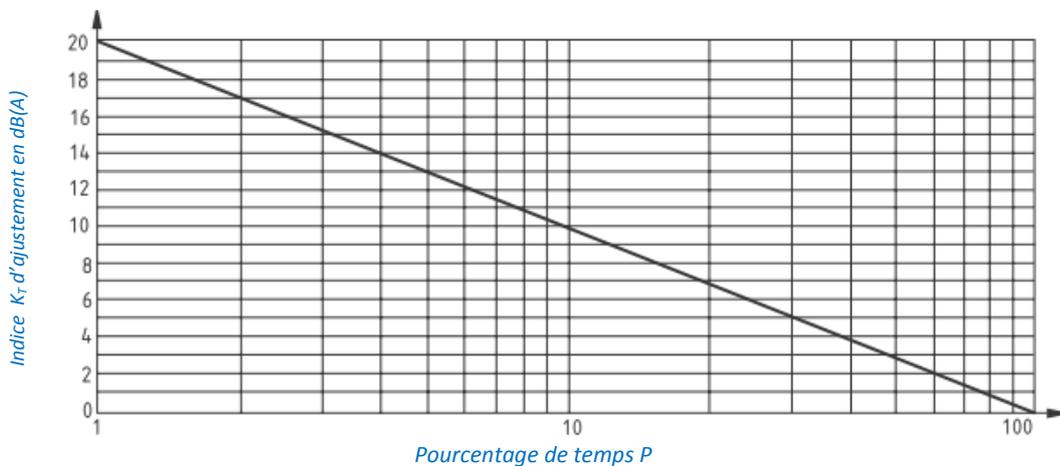
Etape S₅ : Si le point de mesure en réception est situé à moins d'un mètre des façades du bâtiment à protéger, l'onde va se réfléchir et s'ajouter au signal direct avec peu de déphasage, surtout en basses fréquences. Une amplification de +3dB sera à ajouter à la mesure.

Etape S₆: évaluation du pourcentage de temps P ou l'engin sera à plein régime. Ce nouvel indice nommé $K_T(P)$ est à déterminer sur la période T d'observation. Il a été instauré en partant du principe que plus une nuisance sonore est courte, moins elle participera au niveau sonore global sur la période d'observation T .

Si l'apparition du bruit de fonctionnement de l'engin étudié est d'une durée t , le pourcentage de t par rapport à la durée global de mesure T sera : $P = t/T$.

Ce facteur K_T est à relever sur l'abaque suivant :

Tableau XXII : Abaque précisant l'indice d'ajustement $K_T(P)$ à soustraire au niveau L_{WA} pour le calcul du LAeq. (BS 5228-1, 2009).



Ce terme K_T correctif sera donc à soustraire du niveau LA_{eq} en cours d'estimation.

A-3-2-2 Méthode d'évaluation pour les activités de chantier de type mobile :

Engins de chantier mobiles sur un périmètre restreint :

Cette configuration peut convenir pour les engins qui se déplacent régulièrement d'un point à un autre avec des vitesses comprises entre 5 et 10 km/h. Cela peut être le cas, par exemple, d'une pelleuse qui va déplacer un tas de terre sur une autre aire de réception.

Etape M_1 = Etape S_1 : Il faut connaître la puissance acoustique L_{WA} de l'engin étudié.

Etape M_2 : Mesurer la distance la plus courte R' entre le périmètre de la zone de travail de l'engin et le lieu d'habitation.

Etape M_3 =Etape S_3 : Calculer le terme d'atténuation $K'(R')$ à l'aide du tableau XX.

Etape M_4 = Etape S_4 : Si un écran acoustique se trouve sur le chemin de propagation, ajouter l'atténuation D .

Etape M_5 =Etape S_5 : Si la mesure est situé à 1 mètre des façades, ajouter 3 dB à la mesure.

Etape M_6 : Mesurer la distance R'' entre les deux points du chantier correspondant au trajet de l'engin. Ensuite, calculer le ratio de distance D' correspondant au rapport de la longueur du déplacement R'' de l'engin sur la distance R' .

Etape M_7 : Se rapporter au tableau XXIII pour le calcul du facteur de correction temporel F .

Tableau XXIII : Relation entre le ratio de distance D' et son facteur de correction temporel F (BS 5228-1, 2009).

<i>Ratio D'</i>	<i>Facteur F</i>
0,5	1,00
0,7	0,80
1	0,63
1,5	0,50
2	0,40
3	0,28
4	0,20
5	0,16
6	0,13
7	0,10
8	0,09
9	0,08
10	0,08
>10	0,06

Etape M₈ : Evaluation de la durée de travail T' de l'engin.

Etape M₉ : Calcul du pourcentage d'activité P correspondant au produit du temps d'activité T' par le facteur de correction temporel F divisé par T = la durée total d'activité de chantier. Cela donne l'équation suivante : $P = (F \times T') / T$

Etape M₁₀ = Etape A₆ : Calcul du facteur d'atténuation $K_T(P)$ précisé dans le tableau XXII.

Engins de chantier mobiles de transport :

Il est question d'engins qui font la navette entre le chantier et un autre site. Cela peut être une évacuation de gravats vers un autre site en dehors du chantier ou la livraison de matériaux.

Etape M₁₁ = Etape S₁ : Il faut connaître la puissance acoustique L_{WA} de l'engin étudié.

Etape M₁₂ : Mesure du niveau sonore L_{Aeq} entre la trajectoire du véhicule et le lieu de mesure. Il dépendra de la puissance acoustique L_{WA} de l'engin, du nombre C de passage de l'engin par heure, de sa vitesse moyenne V en Km/h, ainsi que de la distance d en mètres entre le point de mesure et le centre du chemin emprunté par les véhicules.

$$L_{Aeq} = L_{WA} - 33 + 10 \log_{10}(C) - 10 \log_{10}(V) - 10 \log_{10}(d)$$

Eq A3-6

Remarque : Si l'engin de transport dispose de deux moteurs (exemple : camion malaxeur à ciment), il conviendra d'ajouter 3 dB(A) au L_{Aeq} correspondant.

Etape M_{t3}= Etape S₄ : Si un écran acoustique se trouve sur le chemin de propagation, ajouter l'atténuation D .

Etape M_{t4}=Etape S₅ : Si la mesure est situé à 1 mètre des façades, ajouter 3 dB à la mesure.

Etape M_{t4} : Si l'angle de vue horizontal α du trajet emprunté par l'engin est inférieur à 180°, il faudra appliquer une atténuation $A(\alpha)$ définie par l'équation :

$$A(\alpha) = 10\text{Log}_{10} (\alpha/180^\circ)$$

Eq A3-7

Etape M_{t5} : Estimer le pourcentage de la durée de l'activité de l'engin t_i par rapport à la durée totale du chantier T . Calculer le ratio $P = (t_i/T)$ et se reporter au tableau XXII pour l'indice K_T d'ajustement.

Sommation des niveaux sonores :

Pour l'évaluation sonore d'une phase de chantier sur une journée, il faudra au final additionner les énergies acoustiques calculées suivant les différentes méthodes correspondantes au type d'activité de l'engin.

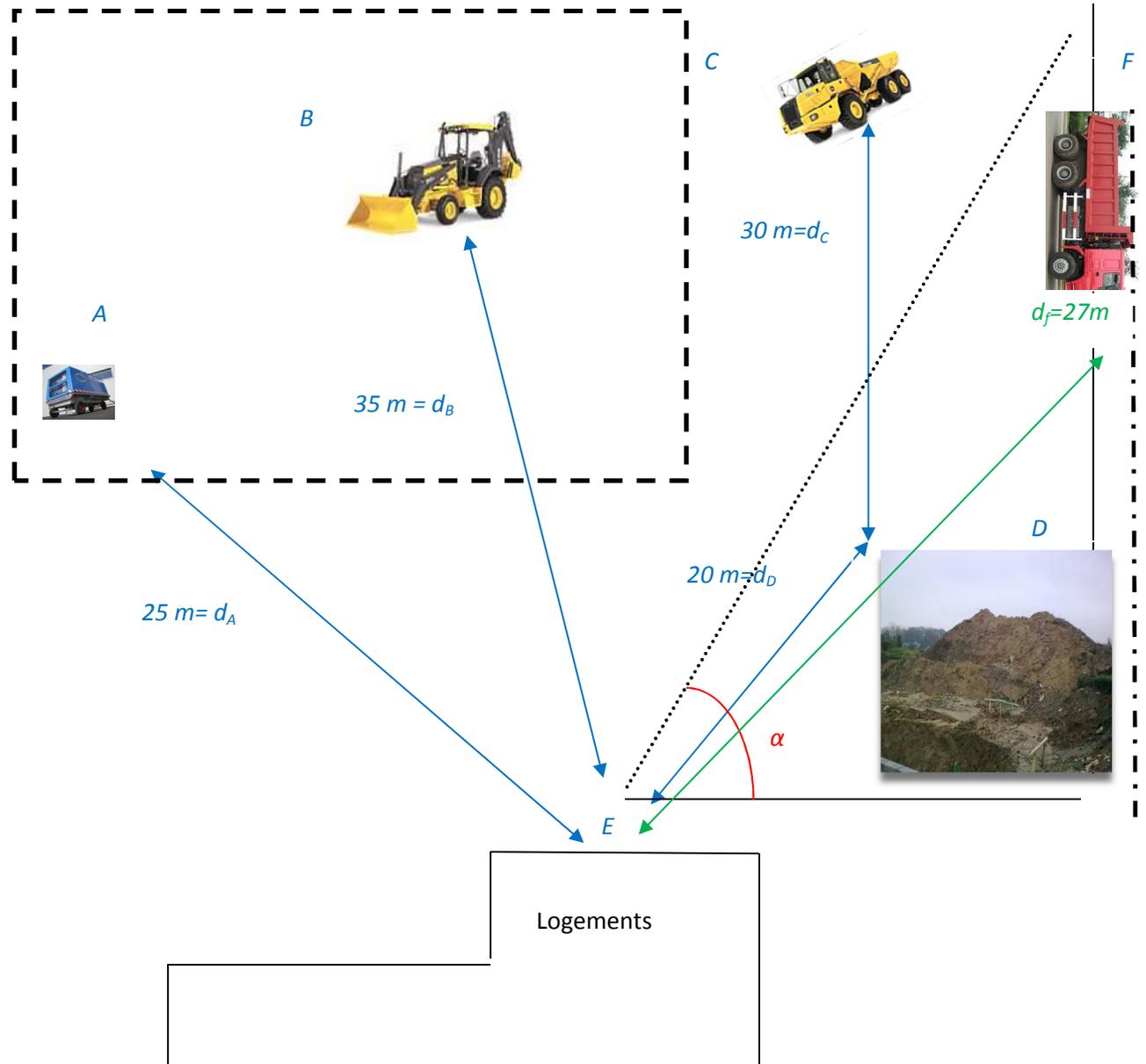
Cette sommation se fera en application de la formule suivante :

$$L_{Aeq(T)} = 10\text{Log}_{10} \left[\sum_{i=1}^{i=n} 10^{\frac{L_{Aeq_i}}{10}} \right]$$

Eq A3-8

A-3-3 Mise en pratique de la méthode normalisée :

Exemple de calcul du niveau sonore de l'activité d'un chantier par rapport à un point de mesure situé à 1 mètre des façades



Légende :

- A : Groupes compresseurs
- B : Chargeuse pelleteuse sur chenille
- C : Tombereau
- D : tas de gravats
- E : Point de mesure à 1 mètre des façades d'un immeuble d'habitation
- F : Camion de transport

Figure 37 : Plan d'implantation des engins de chantier pour estimation des niveaux sonores au point de mesure E .

-Définition des éléments de calcul :

Il est question de réaliser l'estimation du niveau sonore d'une phase de chantier mettant en scène un groupe compresseur, une chargeuse pelleuse, un tombereau et un camion de transport.

- Détermination des puissances acoustiques :

On va se référer aux textes réglementaires applicables dans ce domaine à savoir l'arrêté du 22 mai 2006 et du 18 mars 2002.

-Les groupes compresseurs *A* : $L_{WAH}=97 \text{ dB}(A)$

-Chargeuse –pelleuse *B* : $L_{WAH}= 103 \text{ dB}(A)$

Le type de travail de cet engin sera du terrassement qui sera identique à une ouverture de chantier sans chargement de camion : $C_T= -2 \text{ dB}(A)$

Le matériau mis en œuvre sera de la terre végétale : $C_M= +1 \text{ dB}(A)$

Nature du sol absorbante : $C_S= -2 \text{ dB}(A)$

$$L_{WA} = L_{WAH}+C_T+C_M+C_S = (103 -2+1-2) \text{ dB} (A) = 100 \text{ dB}(A)$$

-Tombereau *C* : $L_{WAH}=101 \text{ dB}(A)$

-Camion de transport *F* : $L_{WAH}=98 \text{ dB}(A)$

- Détermination des durées d'activités des différents engins sur le chantier :

La durée journalière d'un chantier sera estimée à une période de $T = 8$ heures

La durée individuelle T' de chaque engin est définie comme suit :

Groupe compresseur : 6 heures.

Chargeuse pelleuse : 3 heures.

Tombereau : 5 heures.

Camion de transport : 4 heures.

-Nature du terrain :

Le terrain du chantier sera défini comme absorbant. Les termes correctifs s'y rapportant seront donc à prendre en compte à savoir C_S pour le calcul de la puissance acoustique de l'engin, K'_S pour celui de l'atténuation due à la distance.

-Détermination des facteurs d'atténuation ou d'amplification pour chaque engin :

●Engins statiques :

-Pour le groupe compresseur *A*: la distance $R= d_A = 25 \text{ mètres}$

$$K'_S(d_A) = 25 \text{Log}_{10}(25)+1 = 36 \text{ dB}(A)$$

Il fonctionne 6 heures sur les 8 heures de la durée journalière du chantier. Donc $P=6/8 = 75\%$

Sur le tableau XXII, nous obtenons un $K_T= 1 \text{ dB}(A)$

-La chargeuse-pelleuse *B* sera considérée comme statique car son déplacement est minime par rapport à la distance d_B .

La distance $R = d_B = 35$ mètres

$$K'_S(d_B) = 25 \log_{10}(35) + 1 = 39,5 \text{ dB(A)}$$

Cet engin fonctionnera 3 heures sur les 8 heures de la durée journalière du chantier.

$$\text{Donc } P = 3/8 = 37,5 \%$$

$$K_T = 4 \text{ dB(A)}$$

● Engins mobiles :

-Le tombereau **C**:

La distance $R' = d_D = 20$ mètres

$$K'_S(d_D) = 25 \log_{10}(20) + 1 = 33 \text{ dB(A)}$$

Calcul du ratio D' :

$$R'' = d_C = 30 \text{ mètres}$$

$$D' = R''/R' = (30/20) \text{ mètres} = 1,5$$

Sur le tableau XXIII, nous obtenons un facteur $F = 0,50$

La durée d'activité est de $T' = 5$ heures. Le pourcentage P d'activité sera donc de :

$$P = (F \times T')/T = (0,5 \times 5)/8 = 31,25\%$$

Sur le tableau XXII, nous obtenons un terme d'atténuation :

$$K_T(P) = K_T(31,25) = 5 \text{ dB(A)}$$

-Le camion de transport **F**:

La distance entre le point de mesure et le centre du chemin est : $d_F = 27$ mètres

Le nombre de passage du véhicule par heure a été estimé à : $C = 12$ véhicules/heure

La vitesse moyenne est de : $V = 30$ km/h

Appliquons la formule de calcul Eq A3-6 suivante :

$$L_{Aeq} = L_{WA} - 33 + 10 \log_{10}(C) - 10 \log_{10}(V) - 10 \log_{10}(d)$$

$$L_{Aeq} = 98 - 33 + 10 \log_{10}(12) - 10 \log_{10}(30) - 10 \log_{10}(27) = 98 - 33 + 10,8 - 14,8 - 14,3 = 46,7 \text{ dB(A)}$$

$$\approx 46,5 \text{ dB(A)}$$

L'angle de vue est de $\alpha = 45^\circ$. Un nouveau terme d'atténuation A est à calculer :

$$A(\alpha) = 10 \log_{10}(\alpha/180^\circ)$$

$$A(45^\circ) = 10 \log_{10}(45/180) = 10 \log_{10}(0,25) = 6 \text{ dB(A)}$$

Cet engin dispose que d'un seul moteur donc pas de terme d'amplification de +3 dB.

La durée d'activité $T' = 4$ heures, soit un pourcentage de temps $P = T'/T = 4/8 = 50\%$

Le facteur K_T sera donc de :

$$K_T(50\%) = 3 \text{ dB(A)}$$

-Détermination du niveau sonore global au point de mesure :

Au final, pour connaître le niveau sonore de l'ensemble de ces différents engins au point de mesure E , à un mètre des façades de l'immeuble d'habitation le plus exposé, il faudra faire la

somme $LAeq_i$ des différents niveaux sonores calculés pour chacun des engins en activité sur le chantier. La formule pour le calcul de ce niveau global est la suivante :

$$LAeq(T) = 10 \log_{10} \left[\sum_{i=1}^4 10^{0,1 LAeq_i} \right]$$

Nous allons synthétiser l'ensemble de ces résultats sous forme de tableaux.

Engins statiques :

Indice i	Engin	Etape S ₁ L _{wA} (dBA)	Etape S ₂ Distance R (en mètres)	(-)Atténuation / (+) Amplification			Durée de fonctionnement T' de l'engin (en heure)	Pourcentage d'activité P = T'/T (T : durée total d'activité de chantier)	Etape S ₆ K _T (P) dB(A)	L _{Aeqi} résultant à la distance R (en dB(A))
				Etape S ₃ Atténuation K'	Etape S ₄ Atténuation Ecran D	Etape S ₅ Amplification façade				
1	Groupes compresseurs	97	25	-36	aucune	+3	6 heures	75%	-1	63
2	Chargeuse pelleuse	100	35	-39,5	aucune	+3	3 heures	37,5 %	-4	59,5

Engins mobiles :

Indice i	Engin	Etape M ₁ L _{wA} (dBA)	Etape M ₂ Distance R' (en mètres)	(-)Atténuation / (+) Amplification			Etape M ₆ Ratio de distance D	Etape M ₇ Facteur de correction de temps F	Etape M ₈ Durée d'activité T' (en heure)	Etape M ₉ Pourcentage d'activité P= (F×T')/T	Etape M ₁₀ Facteur K _T (P) (en dB(A))	L _{Aeqi} résultant à la distance R' (en dB(A))
				Etape M ₃ Atténuation K' (en dB(A))	Etape M ₄ Atténuation Ecran D	Etape M ₅ Amplification façade						
3	Tombereau	101	20	-33	aucune	+3	1,5	0,5	5	31,25%	-5	66

Indice i	Engin	Etape M ₁₁ L _{wA} (dBA)	Etape M ₁₂ L _{Aeq} (en dB(A))	(-)Atténuation / (+) Amplification				Durée d'activité T' (en heure)	Pourcentage d'activité P= (T')/T	Etape M ₁₆ Facteur K _T (P) dB(A)	L _{Aeqi} résultant à la distance d _f (en dB(A))
				Etape M ₁₃ Atténuation Ecran D (en dB(A))	Etape M ₁₄ Amplification façade (en dB(A))	Angle de vue α (en degré)	Etape M ₁₅ A(α) (en dBA)				
4	Camion de transport	98	46,5	aucune	+3	45	-6	4	50%	-3	46,5
										L_{Aeq} (T)	68,5 dB(A)

Donc pour cette phase de chantier comprenant un groupe compresseur, une chargeuse pelleuse, un tombereau et un camion de transport, un niveau global de 68,5 dB(A) est obtenu au point de mesure E, point le plus exposé aux nuisances sonores au regard de la configuration du lieu.

Il est certain que cette méthode n'est qu'un moyen d'obtenir une estimation dont la marge d'erreur peut être plus ou moins importante suivant la configuration et la complexité du site. Cependant, elle permet d'obtenir des niveaux sonores relatifs des différentes phases de travaux qui serviront de repères lors de l'organisation chronologique du chantier. Cet aspect a été développé dans la 6^{ème} partie de ce document.

A4 Prévision des niveaux vibratoires

Sur un chantier, les sources de vibrations rencontr es sont principalement le battage ou le vibrofonçage de pieux pour l'installation de fondations profondes et le compactage des sols après terrassement ou recouvrement de tranch es pour la Voirie et Réseaux Divers (VRD) propres à la construction du bâtiment.

Il faut rappeler que les vibrations sont class es en deux catégories relativement à la gêne qu'elles peuvent engendr es :

- les ondes continues
- les ondes intermittentes.

Cette nomenclature est reprises par les différentes normes en la matière et notamment par la circulaire du 23 juillet 1986 relative aux vibrations mécaniques émises dans l'environnement par les ICPE (Voir §2-2-2-2).

Pour ce qui concerne les engins de chantiers, voici une liste non exhaustive respectant ces critères de sélection :

Tableau XXIV : Engins de chantiers associ es au type de vibrations produites (RICHART, 1970).

Vibrations intermittentes	Vibrations continues
Battage de pieux	Matériel de terrassement :
Dynamitage	Véhicules � chenille
Marteaux piqueurs	Vibrofonçage de pieux
Briser roche	Nivellement du sol par vibration :

La propagation des vibrations dans un milieu solide comme le sol est plus complexe que la physique des ondes aériennes sur de courtes distances (moins de 300 mètres). En effet, le milieu de propagation n'est pas nécessairement homogène sur tout le parcours qu'empruntera la vibration ce qui complique sérieusement les tentatives de modélisation pour prévoir quel sera le niveau vibratoire à une distance r de la source.

Il va donc être question, dans un premier temps, de préciser succinctement, les différents paramètres du sol qui peuvent jouer sur la propagation de l'onde vibratoire.

Puis, dans un second temps, il sera propos e deux méthodes d'évaluation des vitesses particulières rencontr es dans la littérature. Pour certaines de ses méthodes, une étude

préliminaire sur le terrain sera nécessaire avec apport in situ d'une source vibratoire (marteau piqueur ou autres) afin de définir certains paramètres qui vont être utilisés dans les équations de prévision.

La première, que l'on pourrait nommer de méthode se référant à la source, se base sur l'énergie initiale que l'engin transmet au sol au point d'impact. Elle sera qualifiée de « méthode énergétique ».

La seconde s'appuie sur le chemin de propagation de l'onde vibratoire entre la source et le bâtiment à protéger. Elle sera dénommée « méthode des vitesses relatives ».

A-4-1 Paramètres physiques du sol

La géologie est une science complexe. Les paramètres qui vont jouer sur la propagation des vibrations se résumeront essentiellement à deux :

- La granulométrie
- La teneur en eau

La granulométrie d'un sol se traduit par le volume des grains le constituant. Plus leur diamètre sera important plus il y aura de vide entre eux.

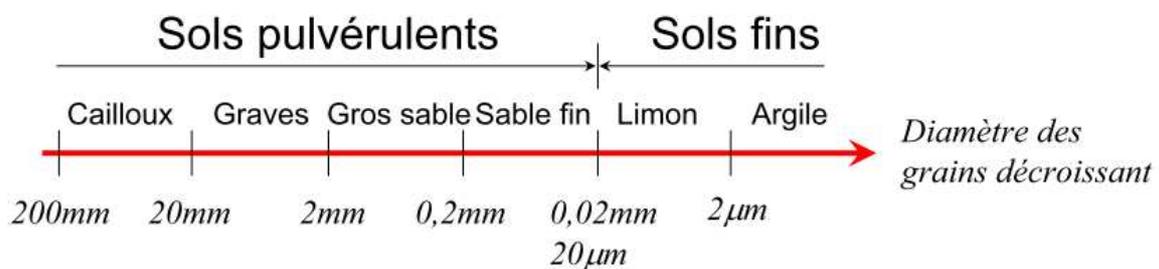


Figure 38 : Classement des sols suivant leur granularité.

Dans ces vides peut se loger des molécules d'eau. Le taux d'occupation de l'eau par rapport au vide entre les grains indique la saturation en eau du sol. L'indice caractérisant cette propriété est le $S_r = V_{\text{eau}} / V_{\text{vide}}$, moyenne qui compare le volume d'eau et le celui du vide restant entre chaque grain.

Cette granulométrie couplée avec cet indice S_r va jouer sur deux aspects de la propagation de l'énergie de l'onde vibratoire.

Le premier est relatif à une perte d'énergie en chaleur. Ce phénomène, appelé communément **amortissement matériel**, peut se décrire ainsi. L'énergie vibratoire initiale se transforme en énergie cinétique qui va se communiquer de proche en proche en une vitesse particulière des éléments du sol qui seront sur la trajectoire de l'onde.

Lors du déplacement de ces particules du sol, des forces de frottements entre les granules vont transformer une partie de cette énergie en chaleur.

Le second est lié à la célérité de l'onde dans le milieu. La teneur en eau va jouer sur la plasticité du sol. Cette différence d'élasticité jouera sur le module de Young E (unité de pression : le Giga Pascals), le coefficient de Poisson ν (unité sans dimension) et le module de cisaillement G (unité de pression : le kilo Pascal) qui entre dans l'équation de la célérité de l'onde dans un milieu solide.

Selon la nature de l'onde (§A1), voici les équations définissant les différentes célérités C (KINSLER *et al.*, 1982) suivant les constantes E, G, ν et ρ , la masse volumique du sol (en tonnes/m³) :

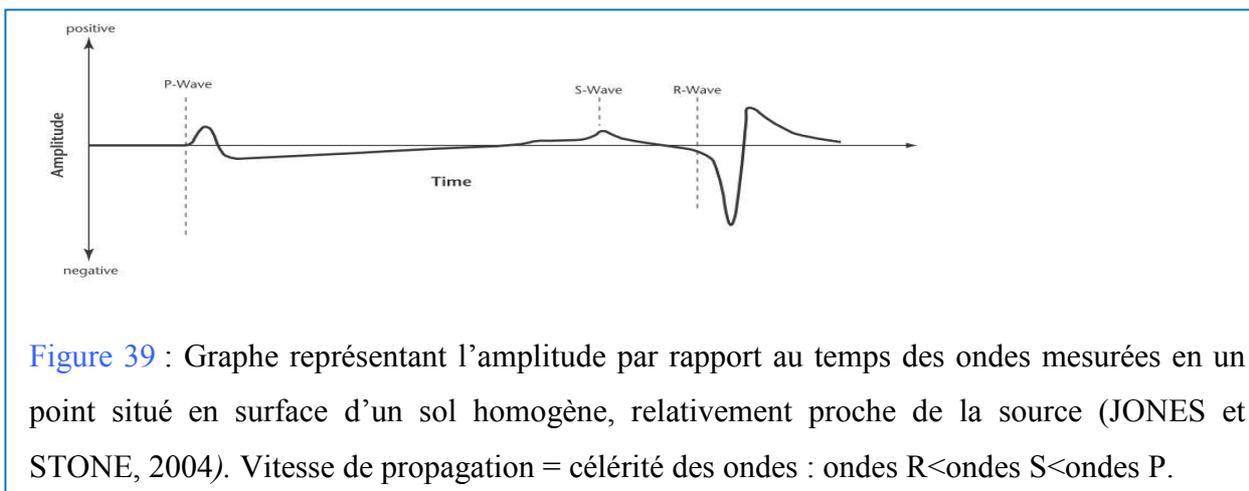
Pour les ondes de volume :

- Les ondes primaire P : $C_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)(1+\nu)}}$
- les ondes secondaires S : $C_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$

Pour les ondes de surface :

- Les ondes de Rayleigh R : $C_R = \sqrt{\frac{0,87+1,12\nu}{(1+\nu)}} C_s$

La hiérarchie des célérités suit la dénomination du nom des ondes à savoir que les ondes primaires se propagent plus rapidement que les ondes secondaires qui elles-mêmes sont plus rapides que les ondes de Rayleigh. Ceci peut se retrouver lors d'un point de mesure in situ comme sur le graphique qui suit :



Cette **différence de célérité des ondes** peut devenir un élément important car suivant la position du point de mesure, des amplifications ou atténuations pourront s'opérer. Sur de

courtes distances, il est possible que le point de mesure le plus proche de la source ne soit pas forcément celui qui indiquera les niveaux d'amplitude les plus élevés.

Par ailleurs, dans des sols hétérogènes, des phénomènes de réflexion et de réfraction peuvent s'opérer entre couches d'impédances différentes. Les ondes peuvent ainsi être amplifiées par résonance de couches ou se propager à des distances anormalement grandes par une couche superficielles qui se comporte comme un guide d'onde.

Si le sol est stratifiée de couches diverses, les **ondes** de surface peuvent également devenir **dispersives**, à savoir que leur vitesse de propagation c sera différente suivant leur fréquence.

Par ailleurs, lorsqu'on s'éloigne de la source, un autre phénomène d'atténuation appelé atténuation géométrique s'opère.

Cette **atténuation géométrique** s'explique par le fait que l'énergie d'une onde se propage sur un front d'onde qui correspond à une surface. Plus on s'éloigne de la source, plus la surface de ce front d'onde augmente et plus l'énergie se dilue par rapport à cette surface grandissante et moins il y a de l'énergie pour mettre en mouvement les particules du sol. D'après KINSLER *et al.* (1982), le point important est la forme de cette surface mais également la distance du point de mesure par rapport à la source.

L'énergie transmise par la propagation vibratoire est du type énergie cinétique. Sa formulation s'écrit :

$$E = \frac{1}{2} k v^2 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2E}{k}}$$

Eq A4-1

avec k : coefficient de rigidité dépendant du milieu

v : vitesse particulaire

E : Energie cinétique

Pour les ondes de volume de type P ou S, de type sphérique, l'atténuation de l'énergie est inversement proportionnelle à la surface de la sphère donc à son rayon r^2 ($E \sim \frac{1}{r^2}$). La vitesse particulaire subira donc une atténuation qui sera proportionnelle en $1/r$ en champ lointain (voir v dans l'Eq A4-1).

Pour les ondes R de surface, dont la propagation est du type cylindrique, l'atténuation de l'énergie sera donc inversement proportionnelle à la surface d'un cylindre, donc à son rayon r ($E \sim \frac{1}{r}$). entraînant une atténuation de la vitesse particulaire proportionnelle en $\frac{1}{\sqrt{r}}$.

Par ailleurs, une étude statistique (AMICK et GENDREAU, 2000), précise que la transmission des énergies suivant la nature de l'onde, respecterait, au point de mesure, la répartition suivante :

67% ondes R

26 % ondes S

7 % ondes P

Donc, les ondes P et S sont celles qui s'atténuent le plus rapidement au regard des ondes R (Voir figure 38). Ce sont donc les ondes R qui seront les plus représentatives du phénomène vibratoire au niveau énergétique par rapport à la source de vibration. De plus, au niveau spectral, les basses fréquences sont celles qui s'atténuent le moins vite avec la distance.

Il existe également, suivant la nature du sol, des **phénomènes d'amplification de fréquence** (ou de fréquences moins atténuées) peuvent se produire. C'est le résultat d'une étude (HEAD et JARDINE, 1992) qui a été réalisée dans différents sols avec pour source vibratoire un engin pour vibrofoncer les pieux. Cette expérience a été opérée avec un mouton vibreur fonctionnant à des fréquences comprises entre 25 et 30 Hz. Les résultats montrent que suivant la nature du sol, un filtrage en fréquences s'opère, ce qui ajoute un paramètre supplémentaire pour la propagation des ondes dans les sols.

Tableau XXV : Fréquences de résonance pour différents sols testés lors de vibrofonçage de pieux.

Nature du sol	Plages de fréquences de résonances (en Hertz)
Limon et argiles doux	5-20
Argiles molles et sables lâches (non compact)	15-25
Sables compacts, graviers et argiles sèches	15-40
Roches légères	30-80
Roches dures	>50

Donc, les paramètres jouant sur la propagation des vitesses vibratoires dans un milieu solide comme les sols, sont nombreux, ce qui rend la modélisation complexe.

Des modèles simplificateurs vont donc être créés et discutés dans ce qui suit.

A-4-2 Différentes méthodes d'évaluation des niveaux vibratoires

A-4-2-1 Méthode énergétique

La méthode énergétique se réfère à l'énergie initiale W_0 transmise par l'engin au point de contact avec le sol. Pour le fonçage des pieux, cette énergie peut être calculée en se référant à la technique utilisée, à savoir par battage ou vibrofonçage.

Pour le **battage de pieux** :

- Masse m lâchée à une hauteur h : on utilise le concept d'énergie potentielle E_p par choc individuel :

$$\text{Energie par coup frappé } \boxed{W_0 = E_p = mgh = 9,807 mh}$$

Avec g : accélération de la pesanteur = $9,807 \text{ m.s}^{-2}$

m : en kg

h : en mètre

- Mouton diesel : on utilise le couple M du moteur utilisé pour un coup :

$$\text{Energie par coup frappé } \boxed{W_0 = gM}$$

Avec M : couple du moteur en Kg.m

g : accélération de la pesanteur = $9,807 \text{ m.s}^{-2}$

Pour le **vibrofonçage de pieux** ou le **compactage** du sol, on va utiliser la puissance nominale du moteur par rapport à la fréquence vibratoire utilisée :

- Energie par période = $\boxed{W_0 = 1000P/f}$

Avec P : puissance nominal du moteur en Watt

▪ f : fréquence du vibreur en Hertz

Connaissant l'énergie de la source de vibration W_0 , plusieurs études et mesures ont été menées sur le battage de pieux. Celles d'ATTEWELL et FARMER (1973) ont été réalisées sur plusieurs sites à des distances différentes.

Sur un graphe représentant les vitesses vibratoires du sol par rapport à la distance de mesure r du pieu, l'ensemble des résultats a été encadré par deux droites de corrélation dont l'équation générale a été établies comme suit :

$$\boxed{V(r) = F(K, W_0, r) = K \frac{\sqrt{W_0}}{r}}$$

Eq (A4-2)

W_0 : énergie à la source en Joules

r : distance entre le point de mesure et la source vibratoire

Avec $V(r)$: vitesse particulière à la distance r en mm.s^{-1}

K : coefficient empirique

La première droite est donnée par la valeur moyenne, ou basse, de K qui a été établie à $0,75$.

Pour la seconde droite, utile pour une plus grande sécurité d'évaluation, sa valeur haute a été calculée à $1,5$, ce qui donne une droite des valeurs maximales limites que le battage de pieux peut atteindre.

Par ailleurs, une étude de SVINKIN (1999) a révélé que **la nature du pieu** pour le transfert d'énergie dans le sol avait également de l'importance. Ainsi, pour un même battage avec une

énergie W_t transmise par le mouton au pieu, s'il est composé de bois cela ne donnera pas les mêmes résultats que s'il était constitué en acier ou en béton.

Une nouvelle formule précise la vitesse vibratoire maximale transmise dans le sol à la tête du pieu :

$$V_0 = F(c, Z, L, W_t) = \sqrt{2 \frac{c}{ZL} W_t} \quad \text{Eq (A4-3)}$$

Avec :

- V_0 : La vitesse particulière maximale à la tête du pieu ($r=0$)
- c : La vitesse de propagation des vibrations dans le pieu (qui dépend de sa composition matérielle)
- Z : L'impédance du pieu, avec $Z = \frac{ES}{c}$, avec E : module d'élasticité de Young
- S : la section du pieu (en m^2)
- c : la vitesse de propagation dans le pieu initialement définie
- L : la longueur du pieu
- W_t : L'énergie transmise au pieu par le mouton.

Une autre formule, ressemblant à l'Eq (A4-2), mais de caractère plus universelle, appelée communément *relation de pseudo-atténuation*, s'écrit sous la forme suivante :

$$V(r) = F(K, W_0, r, m) = K \left(\frac{\sqrt{W_0}}{r} \right)^m \quad \text{Eq (A4-4)}$$

Avec :

- $V(r)$: vitesse particulière à la distance r en $mm \cdot s^{-1}$
- K : coefficient empirique
- W_0 : Energie au niveau du point d'impact du pieu dans le sol (en Joules)
- m : coefficient de pseudo-atténuation.
- r : distance entre le point de mesure et la source vibratoire (en mètres)

Cette équation est la synthèse de différentes études étalées sur une période allant de 1991 à 2002.

Concernant les paramètres K et m , leurs valeurs diffèrent suivant les différentes études consultées.

Pour ATTEWELL et FARMER (1973) pour le battage de pieux :

$$K = 1,33$$

$$m = 0,73$$

Pour la norme anglaise BS 5228 Partie 4 (1992), pour ce qui concerne le fonçage de pieux :

$$K = 0,75$$

$m = 0,75$ pour le battage

$m = 1$ pour le vibrofonçage

Pour l'Eurocode 3, les valeurs des différents paramètres sont plus nuancées :

$$m = 1$$

$K = 0,7$ pour le vibrofonçage

$K = 1$ pour les sols denses et durs

$K = 0,5$ pour les sols meubles et souples

} Pour le battage de pieux

D'après ces différents paramètres, l'Eurocode 3 donne le tableau suivant répertoriant des distances minimales à respecter pour éviter des dommages à différents types de bâtiments, en utilisant les paramètres de l'Eq (4-12) :

Tableau XXVI : Distances minimales r , en mètre, à respecter pour le fonçage de pieux afin d'éviter tout dommages dans les bâtiments avoisinant, selon l'Eurocode 3. (avec

$$r = K \left[\frac{\sqrt{W_0}}{v} \right].$$

Type d'édifice	Méthodes de fonçage de pieux				
	Battage Nature du sol : argile moyennement dense ($K = 0,75$)		Vibrofonçage ($K = 0,7$)		
	$W_0 = 5\text{kJ/impact}$	$W_0 = 25\text{kJ/impact}$	$W_0 = 2\text{kJ/cycle}$	$W_0 = 10\text{kJ/cycle}$	$W_0 = 50\text{kJ/cycle}$
Architecture ancienne ($v = PPV_{max} = 2\text{mm. s}^{-1}$)	$r = 26,5\text{ m}$	$r = 59\text{ m}$	$r = 16\text{ m}$	$r = 36\text{ m}$	$r = 78\text{ m}$
Zone résidentielle ($v = PPV_{max} = 4\text{mm. s}^{-1}$)	$r = 13\text{ m}$	$r = 30\text{ m}$	$r = 8\text{ m}$	$r = 18\text{ m}$	$r = 39\text{ m}$
Zone commerciale ($v = PPV_{max} = 10\text{mm. s}^{-1}$)	$r = 5\text{ m}$	$r = 12\text{ m}$	$r = 3,1\text{ m}$	$r = 7\text{ m}$	$r = 16\text{ m}$
Zone industrielle ($v = PPV_{max} = 15\text{mm. s}^{-1}$)	$r = 3,6\text{ m}$	$r = 8\text{ m}$	$r = 2,1\text{ m}$	$r = 5\text{ m}$	$r = 10\text{ m}$

Une autre méthode produite par ATTEWELL et FARMER (1973), propose deux nouvelles équations de régression, mais cette fois-ci logarithmiques, suivant que le fonçage de pieux est battu ou vibrofoncé :

Pieux battus :

$$\text{Log} [V(r)] = F(W_0, r) = -0,296 + 1,38 \text{Log} \left(\frac{\sqrt{W_0}}{r} \right) - 0,234 \text{Log} \left(\frac{\sqrt{W_0}}{r} \right)^2 \quad \text{Eq (A4-5)}$$

Pieux vibrofoncés :

$$\text{Log} [V(r)] = F(W_0, r) = -0,213 + 1,64 \text{Log} \left(\frac{\sqrt{W_0}}{r} \right) - 0,334 \text{Log} \left(\frac{\sqrt{W_0}}{r} \right)^2 \quad \text{Eq (A4-6)}$$

Avec $V(r)$: vitesse particulaire à la distance r du pieu
 W_0 : Energie au niveau du point d'impact du pieu dans le sol en Joules

Enfin, la dernière méthode retenue est basée sur une recherche du niveau énergétique qui va tenir compte de l'amortissement dû à la nature du sol représenté par un coefficient α qui variera suivant la fréquence étudiée.

Pour l'application de cette méthode, la nouvelle formule donnée par ATTEWELL et FARMER (1973), s'écrit de la manière suivante :

$$W(r, \alpha(f)) = W_0 e^{-\alpha(f)(r-r_0)} \quad \text{Eq (A4-7)}$$

Avec :

- $W(r, \alpha(f))$: Energie à la distance r de la source avec un amortissement matériel α à la fréquence f symbolisé par la donnée $\alpha(f)$
- W_0 : Energie de l'onde de vibration de la source de référence située à la distance r_0 . On prendra généralement $r_0 = 0$, point d'impact entre le pieu et le sol.
- r : Distance du point de mesure

La variation du coefficient d'amortissement matériel α suivant la fréquence est définie par la relation suivante (MASSARSCH *et al.*, 1995 ; JONGMAN, 1996 ; DRABKIN *et al.*, 1996 ; ATHANASOPOULOS et PELEKIS, 2000) :

$$\alpha(f) = \frac{\pi f}{Qc} \quad \text{avec } f : \text{ fréquence de la vibration étudiée} \quad \text{Eq (A4-8)}$$

Q : facteur de qualité du sol

c : vitesse de propagation de l'onde

Il est possible également de déduire le coefficient α à une fréquence f_2 du coefficient α à une fréquence f_1 de la manière suivante :

$$\left. \begin{aligned} \alpha(f_1) = \frac{\pi f_1}{Qc} \Rightarrow c = \frac{\pi f_1}{Q\alpha(f_1)} \\ \alpha(f_2) = \frac{\pi f_2}{Qc} \Rightarrow c = \frac{\pi f_2}{Q\alpha(f_2)} \end{aligned} \right\}$$

$$\alpha(f_2) = \alpha(f_1) \left(\frac{f_2}{f_1}\right)$$

Eq (A4-9)

Analyse critique des équations se servant du modèle énergétique

A la lecture de ces résultats, plusieurs questions restent en suspens.

Tout d'abord, d'après SVINKIN (1999), toutes ces équations donnent une information uniquement sur la coordonnée verticale du vecteur vitesse, et ne disent rien sur les vitesses transversales ou longitudinales.

Dans cette modélisation du phénomène vibratoire dû au fonçage de pieux, tous les paramètres rencontrés face à une situation donnée, ne peuvent être pris en compte. Par exemple, les caractéristiques physiques du pieu (section, forme, rigidité, impédance...), peuvent avoir une influence lorsqu'elles sont couplées avec celles du sol qui, suivant sa consistance et son hétérogénéité, agiront sur l'amplitude des vibrations transmises. Il faut donc garder une certaine distance par rapport à ces modèles.

Le phénomène reste donc complexe et le fait qu'il n'y ait pas d'harmonisation dans le choix des critères retenus pour ces différentes évaluations rend difficile une comparaison des expériences et donc une évolution constructive dans ce domaine.

A-4-2-2 Méthode des vitesses relatives

La philosophie de cette méthode est différente de celle vue précédemment.

Tout d'abord elle s'appuie sur des mesures in situ. Le principe en est simple. On utilise une source vibratoire du type marteau piqueur ou brise roche. Puis, après excitation du terrain, on réalise une première mesure de vitesse particulière à une distance r_1 de la source vibratoire et on souhaite trouver une formulation pour en déduire la vitesse à une distance r_2 de cette même source. L'avantage de cette méthode est qu'elle tient compte du contexte dans lequel sont réalisées les mesures à savoir la qualité du sol sur l'espace de mesure ou a lieu l'expérience. Ensuite, pour justement prendre en compte de manière plus précise les caractéristiques géophysiques du terrain, il a été retenu trois variables importantes qui jouent un rôle essentiel dans la transmission et la propagation des ondes vibratoires.

La première se réfère à la nature du sol. L'amortissement des vibrations dû à sa constitution granulométrique et hydrométrique vu précédemment (§ A 4-1) et qui transforme une partie de

l'énergie en chaleur par frottement des granulats entre eux, est symbolisé par un coefficient α , communément appelé **coefficient d'amortissement matériel** vu précédemment dans l'Eq A4-8.

La seconde a trait à la perte en énergie due au parcours du front d'onde qui est pris en compte par un second coefficient n , appelé **coefficient d'amortissement géométrique**.

Enfin, la troisième est commune à ces deux coefficients. Elle participe aux deux autres variables puisqu'elle représente **la distance parcourue r** du front d'onde qui joue sur les pertes énergétiques géométriques et élastiques du sol.

La formule générale qui intègre ses différents éléments est attribuée à Bornitz (1931), et se retrouve dans l'équation suivante :

$$V(r_2) = F(r_2, r_1, \alpha, n) = V(r_1) \left[\frac{r_1}{r_2} \right]^n e^{\alpha(r_1 - r_2)} \quad \text{Eq A4-10}$$

Avec α : coefficient d'amortissement matériel (en m^{-1})

n : coefficient d'amortissement géométrique (unité sans dimension)

r_i : distance à la source (en mètres, $i=1, 2$)

Pour ce qui concerne les valeurs des coefficients n et α et pouvoir utiliser l'Eq A4-10, AMICK et GENDREAU (2000) sont partis sur deux hypothèses simplificatrices.

Tout d'abord, dans l'optique de trouver les coefficients n en fonction de la nature du sol, ils ont supposé que l'amortissement matériel était négligeable devant l'amortissement géométrique et ils ont donc posé comme hypothèse de calcul que $\alpha = 0$. Ensuite, ils ont réalisé les mesures sur différents terrains et en ont déduit les différentes valeurs de n en résolvant l'Eq A4-10 simplifiée suivante :

$$V(r_2) = V(r_1) \left[\frac{r_1}{r_2} \right]^n$$

$$\Leftrightarrow \frac{V(r_2)}{V(r_1)} = \left[\frac{r_1}{r_2} \right]^n$$

$$\Leftrightarrow \text{Log} \left[\frac{V(r_2)}{V(r_1)} \right] = \text{Log} \left[\frac{r_1}{r_2} \right]^n \Leftrightarrow n = \frac{\text{Log} \left[\frac{V(r_2)}{V(r_1)} \right]}{\text{Log} \left[\frac{r_1}{r_2} \right]} \quad \text{Eq A4-11}$$

Les résultats obtenus suivant les différentes qualités de sol sont exprimés dans le tableau suivant :

Tableau XXVII : Valeurs du coefficient d'amortissement géométrique n suivant le type de sol (hypothèse $\alpha = 0$).

Typologie du sol	Coefficient d'amortissement géométrique n (sans dimension)
sables	0,8-1,5
argiles	1,4-1,5
limons	0,8
Sol fermes et roches	1-1,7

Ensuite, dans la perspective d'évaluer les valeurs des coefficients α , la seconde hypothèse pour s'affranchir de la variable n est de poser que, dans les différentes expériences, ce sont principalement des ondes de Rayleigh qui s'imposent et dont l'atténuation géométrique s'effectue en $\frac{1}{\sqrt{r}}$. Par rapport à une vitesse V_0 à l'origine de la source, il est possible d'écrire que :

$$\left. \begin{array}{l} V(r_1) = \frac{V_0}{\sqrt{r_1}} \\ V(r_2) = \frac{V_0}{\sqrt{r_2}} \end{array} \right\} \frac{V(r_2)}{V(r_1)} = \frac{V_0}{\sqrt{r_2}} \times \frac{\sqrt{r_1}}{V_0} = \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^{0,5} \Rightarrow V(r_2) = V(r_1) \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^{0,5} \quad \text{Eq A4-12}$$

Donc la valeur de n est égale à la valeur 0,5 relativement à cette hypothèse d'onde de Rayleigh.

Suivant les mesures effectuées sur différents terrains et en respectant cette hypothèse, il a été obtenu les valeurs de α suivantes :

Tableau XXVIII : Valeurs du coefficient d'amortissement matériel α suivant la nature du sol (Hypothèse $n=0,5$).

Nature du terrain	Coefficient d'amortissement matériel α (en m^{-1})
Sable graveleux limoneux	0,13
Sable argileux fin	0,26
Sable à grains fins saturé	0,10
Sable à grains fins saturé en état gelé	0,06
Sable saturé avec lames de tourbe et limon organique	0,04
Sable argileux, argile sableuse et limon au-dessus de l'aquifère	0,04
Craie marneuse	0,1
Loess	0,1
Argile saturée avec sable et limon	0,12
Sable et limon	0,026-0,36
Argile souple de Bangkok	0,026-0,44

Analyse critique de la méthode des vitesses relatives

Les hypothèses de travail semblent s'appuyer sur des terrains à consistance homogène aussi bien sur une distance horizontale que verticale, ce qui n'est pas forcément toujours le cas in situ.

Il est à regretter qu'il n'y a pas d'indication sur la justesse des résultats ou la marge d'erreur à prendre en compte pour une analyse qui soit au plus proche de la réalité.

D'autres études, moins mathématiques mais plus pragmatiques, notamment celle de LUNA (1967), précise que, sur des campagnes de mesures réalisées sur 165 essais de battage et vibrofonçage de pieux dans différents sols, l'énergie des ondes devient négligeable au-delà d'une distance égale à une longueur du pieu pour des sols sablonneux, et égale à deux ou trois fois la longueur du pieu pour des sols argileux. Dans des terrains plus durs, l'énergie peut être transmise sur des distances encore plus grandes.

Donc, pour des fonçages de pieux sur une profondeur de 20 mètres dans le sol argileux, toutes habitations au-delà de 60 mètres ne devraient pas être sujettes à des risques de dommages. Cette information est pratique mais elle ne dit rien pour les bâtiments situés avant les 60 mètres, donc reste incomplète.

Enfin, la période du chantier peut également avoir un impact sur la transmission des vibrations dans le sol. En effet, les changements de températures suivant la saison modifieront la compacité du terrain. Suivant la composition du sol, il pourra devenir plus rigide aux basses températures en hiver par rapport à celle d'été et devenir plus conducteur de la vibration qui se propagera sur des distances plus grandes et pourra impacter un périmètre plus important. Ainsi entre le moment où est réalisée l'étude et le début des travaux, ce type de situation peut se produire.

Il faudra également tenir compte de la nature des vibrations à savoir si ce qu'on mesure relève de vibrations continues ou discontinues ; ce qui entraîne de prendre en compte les différents barèmes aperçus aux §2-2-2-1 et §2-2-2-2 relatifs à la gêne vibratoire par rapport au type de bâtiment.

Les méthodes de prévisions vibratoires étant nombreuses et diverses, l'utilisation de chaque méthode devra être pondérée par l'expérience. Dans l'état actuel des connaissances, il est difficile d'opérer un choix judicieux entre les différentes propositions présentées puisqu'aucune ne recouvre à elle seule toutes les spécificités d'un site.

-Tableau récapitulatif des différentes formules pour le calcul des vitesses vibratoires

Equations	Légende	Numéro de l'équation
$V(r) = F(K, W_0, r) = K \frac{\sqrt{W_0}}{r}$	<p>$V(r)$: vitesse particulière à la distance r en $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$</p> <p>$K$: coefficient empirique</p> <p>W_0 : énergie à la source en Joules</p> <p>r : distance entre le point de mesure et la source vibratoire</p>	Eq A4-2
$V_0 = F(c, Z, L, W_t) = \sqrt{2 \frac{c}{ZL} W_t}$	<p>V_0 : La vitesse particulière maximale à la tête du pieu ($r=0$)</p> <p>c : La vitesse de propagation des vibrations dans le pieu (qui dépend de sa composition matériel)</p> <p>Z : L'impédance du pieu, avec $Z = \frac{ES}{c}$, E : module d'élasticité de Young</p> <p>S : la section du pieu (en m^2)</p> <p>L : la longueur du pieu</p> <p>W_t : L'énergie transmise au pieu par le mouton.</p>	Eq A4-3
$V(r) = F(K, W_0, r, m) = K \left(\frac{\sqrt{W_0}}{r} \right)^m$	<p>$V(r)$: vitesse particulière à la distance r</p> <p>K : coefficient empirique</p> <p>W_0 : Energie au niveau du point d'impact du pieu dans le sol (en Joules)</p> <p>m : coefficient de pseudo-atténuation.</p> <p>r : distance entre le point de mesure et la source vibratoire (en mètres)</p>	Eq A4-4
<p>Pieux battus</p> $\text{Log}[V(r)] = -0,296 + 1,38 \text{Log} \left(\frac{\sqrt{W_0}}{r} \right) - 0,234 \text{Log} \left(\frac{\sqrt{W_0}}{r} \right)^2$	<p>$V(r)$: vitesse particulière à la distance r du pieu</p> <p>W_0 : Energie au niveau du point d'impact du pieu dans le sol en Joules</p>	Eq A4-5
<p>Pieux vibrofoncés</p> $\text{Log}[V(r)] = F(W_0, r) = -0,213 + 1,64 \text{Log} \left(\frac{\sqrt{W_0}}{r} \right) - 0,334 \text{Log} \left(\frac{\sqrt{W_0}}{r} \right)^2$		Eq A4-6
$W(r, \alpha(f)) = W_0 e^{-\alpha(f)(r-r_0)}$	<p>$W(r, \alpha(f))$: Energie à la distance r de la source avec un amortissement matériel α à la fréquence f symbolisé par la donnée $\alpha(f)$</p> <p>W_0 : Energie de l'onde de vibration de la source de référence située à la distance r_0</p> <p>r : Distance du point de mesure</p>	Eq A4-7

Equations	Légende	Numéro de l'équation
$V(r_2) = F(r_2, r_1, \alpha, n) = V(r_1) \left[\frac{r_1}{r_2} \right]^n e^{\alpha(r_1 - r_2)}$	<p>α : coefficient d'amortissement matériel (en m^{-1})</p> <p>n : coefficient d'amortissement géométrique (unité sans dimension)</p> <p>r_i : distance à la source (en mètres, $i=1, 2$)</p>	Eq A4-10
$V(r_2) = V(r_1) \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^{0,5}$	<p>r_i : distance à la source (en mètres, $i=1, 2$)</p>	Eq A4-12

-Quelques exemples de vitesses vibratoires in situ de battage de pieux à différentes distances (BS 5228-2 (2009))

Battage de pieux				
Diamètre du pieu (en mm)	Nature du terrain	Profondeur d'enfoncement du pieu	Energie transmise par le pieu pour chaque impact W_0 (en kJ)	Distance de la mesure r_i Vitesse particulière maximale mesurée $V(r_i)$ (P.P.V : Peak Particle Velocity)
350	Gravier dense en surface et couche calcaire en dessous de 5 à 6 mètres	Entre 9 et 11,5 m	47,1	$r_1=9,2m$ $V(r_1) = 37,9 \text{ mm.s}^{-1}$ $r_2=18,5m$ $V(r_2) = 17,3 \text{ mm.s}^{-1}$
400	Sable fin dense	Entre 4 et 6,5 m	47,1	$r_1=50m$ $V(r_1) = 1,2 \text{ mm.s}^{-1}$ $r_2=63m$ $V(r_2) = 0,72 \text{ mm.s}^{-1}$
450	Argile, sol sec	10m	Non précisé	$r_1=4m$ $V(r_1) = 8,4 \text{ mm.s}^{-1}$ $r_2=20m$ $V(r_2) = 5 \text{ mm.s}^{-1}$
450	Sable fin dense	6m	58,9	$r_1=120m$ $V(r_1) = 1 \text{ mm.s}^{-1}$
350	Graviers en surface et couche calcaire à partir de 3 m de profondeur	Entre 5 et 12,5 m	Entre 23,5 et 35,3	$r_1=10m$ $V(r_1) = 4,2 \text{ mm.s}^{-1}$ $r_2=14m$ $V(r_2) = 2,2 \text{ mm.s}^{-1}$

Vibrofonçage de pieux				
Diamètre du pieu (en mm)	Nature du terrain	Profondeur d'enfoncement du pieu	Energie transmise par le pieu W_0 (en kJ)	Distance de la mesure r_i Vitesse particulaire maximale mesurée $V(r_i)$ (P.P.V : Peak Particle Velocity)
750	Alluvions, graviers et marne	10 m	Entre 2,18 et 3,15	$r_1=35m$ $V(r_1) = 0,29 \text{ mm.s}^{-1}$ $r_2=50m$ $V(r_2) = 0,24 \text{ mm.s}^{-1}$
600	craie, tourbe, craie et limon de gravier, de silex	10 m	Entre 2,18 et 3,15	$r_1=8m$ $V(r_1) = 4,6 \text{ mm.s}^{-1}$ $r_2=16m$ $V(r_2) = 1,1 \text{ mm.s}^{-1}$
350	Argile	14,5 m	11,8	$r_1=10m$ $V(r_1) = 1,1 \text{ mm.s}^{-1}$ $r_2=20m$ $V(r_2) = 0,55 \text{ mm.s}^{-1}$
500	Sable et argile	Non précisée	11,8	$r_1=10m$ $V(r_1) = 1,1 \text{ mm.s}^{-1}$ $r_2=14m$ $V(r_2) = 0,8 \text{ mm.s}^{-1}$
600	Sable, graviers sur couche de craie	12 m	Non précisé	$r_1=3,5m$ $V(r_1) = 2,4 \text{ mm.s}^{-1}$ $r_2=8 m$ $V(r_2) = 1,7 \text{ mm.s}^{-1}$

A-4-3 Couplage sol-bâtiment

Le chemin de transmission des vibrations peut se schématiser ainsi :

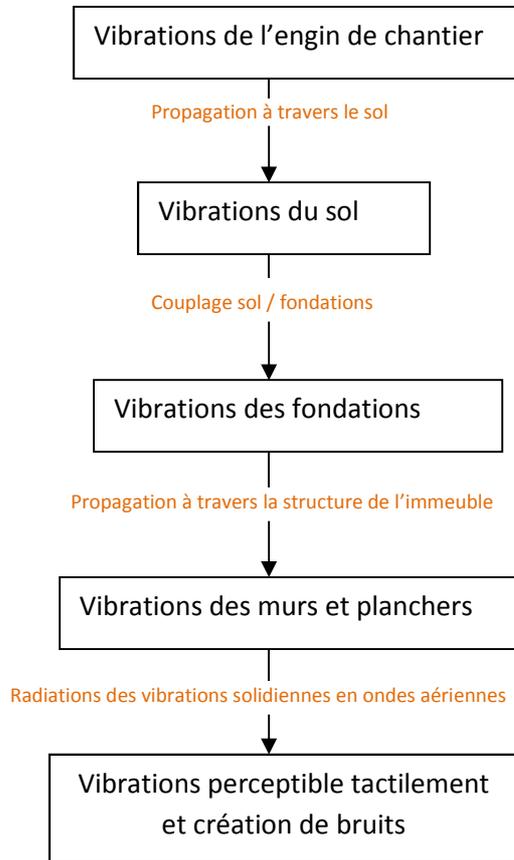


Figure 40 : Chemin de propagation des vibrations de l'engin de chantier à l'immeuble voisin avec transformation de vibrations solidiennes en ondes acoustiques par rayonnement des structures (VOGIATZIS, 2008).

Donc, si l'énergie des vibrations en provenance du chantier est importante, elle peut se transmettre dans les structures des immeubles limitrophes. En effet, les parois peuvent devenir des « membranes » rayonnantes acoustiquement et transformer des vibrations solidiennes en ondes aériennes.

Du bruit s'ajoutera en interne au logement. Le spectre sonore correspondant dépendra notamment des dimensions de la « membrane rayonnante ».

L'évaluation du niveau sonore, **pour chaque bande d'octave**, peut se réaliser par l'application de l'équation suivante :

$$L_p = L_v - 17 \text{ dB} + 10 \text{Log}_{10}(\sigma) + 10 \text{Log}_{10}\left(\frac{4.S.T_r}{0,16 V}\right) \quad \text{Eq (A4-13)}$$

Avec L_p : Niveau de pression acoustique en dB avec $p_0 = 2.10^{-5}$ Pascals

L_v : Niveau de vitesse vibratoire des parois en dB avec $v_0 = 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$

σ : Coefficient de rayonnement des parois (sans dimension)

S : Somme des surfaces rayonnantes en m^2

T_r : Durée de réverbération du local en secondes

V : Volume du local en m^3

Remarque 1 : Le facteur de rayonnement σ se calcule en effectuant le rapport de la puissance rayonnée par la paroi sur la puissance mécanique qui met en vibration la paroi.

Remarque 2 : Dans la littérature, pour le calcul des niveaux de vitesse vibratoire, il existe deux références couramment utilisées pour v_0 : soit $v_0 = 5.10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$, soit $v_0 = 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$. Il a été pris le parti, dans ce mémoire, de prendre la valeur de $v_0 = 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$ comme référence (voir §1-2-2). L'équation A4-13 initiale était donnée pour un $v_0 = 5.10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$. Il a donc fallu ajouter un terme correctif correspondant à $10 \text{Log}_{10}\left(\frac{10^{-9}}{5.10^{-8}}\right) = -17 \text{ dB}$.

A titre d'information, lorsque la source de vibration est très proche du bâtiment concerné, une vitesse vibratoire de 0,1 mm/s peut produire chez le riverain un niveau de bruit de 50 dB(A).

A-4-4 Méthode prévisionnelle par modélisation numérique :

Il existe des logiciels qui permettent de réaliser des cartographies acoustiques et vibratoires d'un site. La méthode se base sur des équations différentielles relatives à la propagation des ondes dont la résolution repose sur des conditions aux limites et une discrétisation de l'espace par différentes méthodes dont les plus usuelles sont par différences finies, par éléments finis, par éléments de frontière, ou par volumes finis. Plus le dimensionnement des éléments sera petit, plus le temps de calcul sera long mais plus les résultats obtenus seront précis. Une des difficultés est donc de trouver le meilleur compromis entre le temps de calcul et la précision souhaitée par rapport à une situation donnée.

Par ailleurs, les calculs créent une situation virtuelle en simulation d'une réalité future. Mais « la carte n'est pas le territoire ». Il faut donc conserver un certain recul pour évaluer la pertinence des résultats et se protéger contre d'éventuelles erreurs de programmation lors de la saisie des paramètres initiaux.

Dans le cadre préventif de pollution sonore due à l'activité de chantier, nous citerons un logiciel particulièrement élaboré. Il s'agit du logiciel « Byoasis » qui a été développé par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (C.S.T.B) pour le compte d'une grande société de construction du bâtiment. Une démonstration a été réalisée le 25 janvier 2012 dans les locaux du C.S.T.B de Saint Martin d'Hères dans le département de l'Isère lors de la journée porte ouverte organisée en partenariat avec la « Semaine du Son ». Cette manifestation annuelle est organisée par une association éponyme reconnue d'intérêt général à caractère social, qui a pour objectif de sensibiliser les gens à leur environnement sonore ainsi qu'à une meilleure connaissance du son.

La particularité de ce logiciel est qu'il est capable de réaliser des cartes de bruit mais également de rendre audible le rendu acoustique de ces calculs. Pour se faire, il dispose d'une banque de sons composée d'échantillons sonores d'engins de chantier. Ensuite, il est possible de reproduire, sur un système de diffusion, les résultats des prévisions des niveaux sonores afin de pouvoir les écouter. Ce système de diffusion peut être composé de plusieurs enceintes couplées à un caisson basse fréquence. Suivant le local dans lequel va être reproduit la simulation, il y a possibilité de choisir le nombre d'enceintes parmi plusieurs propositions. Pour chaque configuration, il y a calibration du système à l'aide d'un sonomètre et d'un signal de référence. Ensuite, suivant les sources sonores modélisées et le point de réception choisi sur la carte, il est possible d'écouter le rendu de la prévision. A un niveau sonore chiffré, exprimé en décibels, correspond maintenant une sensation sonore qui est plus parlante pour un non spécialiste.

Ce logiciel est donc un outil fort utile pour la communication notamment lors de la présentation du projet devant l'assemblée du voisinage. Plusieurs points de mesures pourront être simulés pour présenter, par exemple, les résultats audibles avant et après l'installation d'un écran acoustique afin de démontrer les mesures qui vont être mises en place pour éviter une gêne trop importante.

Aujourd'hui, il y a la possibilité de voir la cartographie statique du bruit liées au lieu et au nombre d'engin simulé sur le chantier. L'évolution de ce logiciel est de joindre une vision dynamique du futur chantier avec le rendu sonore actuellement disponible. Ainsi, les mouvements des engins de chantiers seront synchrones avec l'émission sonore ce qui ajoutera un confort notable dans la simulation.

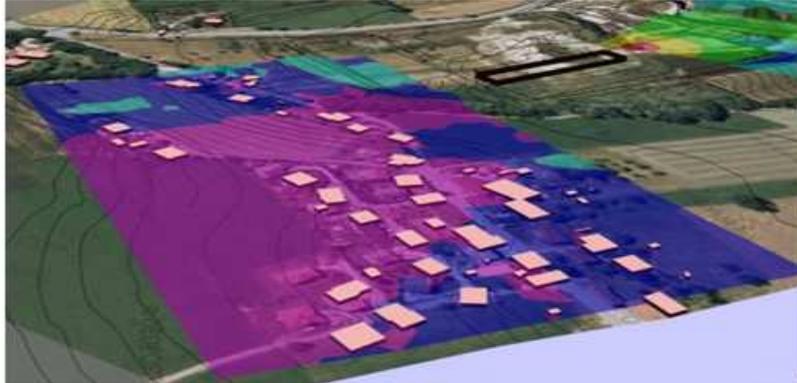


Figure 41 : Exemple de cartographie du bruit où chaque surface colorée correspond à un même niveau sonore estimé.

A titre d'information, un procédé de spatialisation en 3 dimensions est actuellement disponible pour la diffusion de concert en salle ainsi qu'en extérieur (Salle de spectacle de l'Institut du Monde Arabe à Paris / Festival de jazz 2013 du Parc Floral de Vincennes) et qui utilise le procédé Wave Synthesis Field (WFS). Il est tout à fait possible de l'adapter pour la reconstruction d'un espace sonore de chantier.

BIBLIOGRAPHIE :

AKLE E., 2006. *Nuisances à l'environnement liées au fonçage de pieux et palplanche.* Mémoire d'ingénieur en génie civil, INSA de Strasbourg, 71p.

AL ABDEH R., 2005. *Etude des vibrations induites dans le sol par battage et le vibrofonçage de pieux.* Thèse de doctorat en Génie Civil, Université de Lille I, 198p.

AMICK H., GENDREAU M., 2000. Construction vibrations and their impact on vibration-sensitive facilities. *ASCE Construction Congress VI, February 20-22, Orlando, Florida, United States.* Eds, American Society of Civil Engineers (ASCE), Reston (Virginia), pp758-767.

ATHANASOPOULOS G.A., PELEKIS P.C., 2000. Effect of soil stiffness in the attenuation of Rayleigh-wave motions from field measurement. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 19, N° 5, pp371-387.

ATTEWELL P.B, FARMER I.W., 1973. Attenuation of ground vibrations from pile driving. *Ground Engineering*, Vol.6, N° 4, pp26-29.

BENAZET J., 1997. Techniques des démolitions. *Techniques de l'ingénieur*, fascicule C 5 425, 25p.

BLANCHIER A., SAUVAGE A.C , 2004. Utilisation des explosifs dans le génie civil - *Techniques de l'ingénieur*, fascicule C 5 420, 32p.

BS 5228-1, 2009. *Code of practice for noise and vibration control on construction and open site. Part 1: Noise.* British Standards Institution, London, 157p.

BS 5228-2, 2009. *Code of practice for noise and vibration control on construction and open site. Part 2 : vibration Noise.* British Standards Institution, London, 89p.

CORMON P., 1985. Procédés de démolition des ouvrages. *Techniques de l'ingénieur*, fascicule C 2 190, 19p.

DE NEHOUS Lucas – “ Les fondations superficielles ” - Cours de génie civil consultable à l'adresse internet suivante :

http://www.coursgeniecivil.com/IMG/pdf/CoursFond1_FONDATIONS-SUPERFICIELLES - procedes-generaux-de-construction.pdf.

DRABKIN S, LACY H, KIM D.S., 1996. Estimation settlement of sand caused by construction vibration. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol 122, N° 11, pp 920-928.

EUROCODE 3, 1992. Design of steel structures, chapter 5, piling. *DD ENV 1993-1-1:1992 (draft).*

Géophysique GPR International Inc., (Québec), 2008. Evaluation des impacts des sautages, des vibrations et des surpressions d'air du projet minier aurifère à ciel ouvert près de la zone urbaine de Malartic. *Document M-07392 réalisé pour la société GENIVAR S.E.C*, 46p.

HEAD J.M, JARDINE F.M., 1992. Ground-borne Vibrations Arising from Piling. *Construction Industry Research and Information Association (CIRIA)*, Technical Note 142, London, 81p.

JONES and STONES, 2004. Transportation and construction induced vibration – Guidance manual. *California Department of Transportation*, Contract N° 43A0049, Task order N°18, 159p.

JONGMANS D., 1996. Prediction of ground vibration caused by pile driving : a new methodology. *Engineering Geology*, Vol 42, Elsevier, Kidlington, Royaume Unis, pp 25-36.

KINSLER L.E, FREY A.R, COPPENS A.B, SANDERS J.V, 1982. *Fundamentals of acoustics*. 4th edition, John Wiley and Sons, New York, 548p.

LUNA W.A., 1967. Ground vibration due to pile driving. *Fondation Facts*, Vol 3, N°2, Raymond International, Houston, Texas.

MASSARSCH K.R, MADSHUS C, BODARE A., 1995. Engineering vibrations and solutions. *Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Vol 3, St Louis, Missouri, pp 1349-1353.

MERIEL B., 2000. Bruit produit par les chantiers de travaux publics, bruits des engins de chantier : relation entre la puissance d'homologation et la puissance « in situ ». *Ministère de l'environnement*, Mission Bruit.

MILLERON J.F., 2009. La démolition : techniques et métiers connexes. *Techniques de l'ingénieur*, fascicule C 9 005, 10p.

NEEDHAM S, BROOKS D., 1998. *Noise, Vibration and Airblast Control*. Department of the Environment, Environment Australia, 43p.

RAPIN J.M., 1998. La prise en compte de l'impact du bruit sur le voisinage dans l'organisation d'un chantier et la réalisation d'un chantier silencieux. *Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie*, Rapport N° ER 712.97.0011(B).

RICHART, F. E., RUSSEL HALL J., WOOD R.D., 1970. *Vibrations of soil and foundation*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 414p.

ROCHER-LACOSTE F., 2008. *Etude expérimentale en vraie grandeur et étude numérique des pieux vibrofoncés : Vibrations dans l'Environnement et Capacité Portante*. Thèse de doctorat, Ecole nationale des Ponts et Chaussée, spécialité : géotechnique, 200p.

SVINKIN M.R, 1999. Prediction and calculation of construction vibration. *DFI 24th Annual Members' Conf., decades of technology advancing into the future*, Deep Foundation Institut, Englood Cliffs, New Jersey.

VOGIATZIS K., 2008. Groundborne Noise and Vibration Assesment from Metro operation in the New Athens Metro Extension to Piraeus. *Department of civil engineer; University of Thessaly, Greece.*

WHITE D., FINLAY T., BOLTON M., BEARS G , 2002. Press-in piling : ground vibration and noise during pile installation. *Geotechnical Special Publication N° 116,* Editors : O'Neil M.W and Townsend F.C, ASCE, Vol 1, pp 363-371.

RESUME :

Les chantiers de constructions immobilières sont à l'origine de nuisances sonores et vibratoires sur l'environnement. Comment gérer au mieux cette activité au regard du voisinage proche susceptible d'être impacté, tel est l'enjeu de ce mémoire.

Connaître et reconnaître l'impact que cette activité peut avoir sur le voisinage proche, sont les deux faces du même problème.

La première s'appuiera sur une étude d'impact acoustique et vibratoire prévisionnelle. A cet effet, des points de repères sur les niveaux acoustiques et vibratoires du chantier seront précisés au regard des textes réglementaires et/ou normatifs actuellement existant. Les différentes étapes du chantier seront ensuite décrites et des méthodes de calculs prévisionnelles seront proposées.

La seconde relève de la communication. Se rapprocher du voisinage en lui proposant de le rencontrer en l'invitant à s'exprimer lors de l'organisation de réunion regroupant les principaux intervenants du chantier est essentiel. Cet espace permettra d'écouter leur ressenti, de leur exposer le déroulement du chantier et d'expliquer les actions possibles mises en place pour en diminuer l'impact sur leur environnement immédiat.

Mots clés : engins de chantiers, réglementations, normes, bruits, vibrations, isolations, communication.

SUMMARY :

Construction sites are property causing noise and vibration on the environment. How best to manage this activity under the immediate vicinity may be affected, as is the issue of this paper.

Knowing and recognizing the impact that the activity may have on the immediate neighborhood, are two sides of the same problem.

The first is based on a study of acoustic and vibration impact statements. For this purpose, benchmarks on acoustical and vibratory levels of the site will be specified in terms of regulations and / or currently existing normative. Different stages of the project will then be described and methods of forecasting calculations are proposed.

The second is communication. Standing closer to the neighborhood by offering to meet with an invitation to speak at the organization meeting bringing together the main stakeholders of the site is essential. Their feelings will be listened to, and, the course of construction will be explained together with the possible actions implemented to reduce the impact on their immediate environment.

Keywords: construction equipment, regulations, standards, noise, vibration, insulation, communication.