



OPTIMISATION DES TRAITEMENTS VIBRATOIRES DANS LES BÂTIMENTS

#CeQu'ilFautSavoir



- 01** Introduction
- 02** L'origine des vibrations
- 03** Les traitements vibratoires
- 04** L'optimisation des traitements
- 05** Etude de cas



INTRODUCTION

Les enjeux financiers, dus à un impact vibratoire sur une opération immobilière, étant non négligeables (le coût d'une coupure vibratoire pouvant aller jusqu'à plusieurs pour cent du montant des travaux), **la précision des études vibratoires et l'optimisation de la performance des traitements sont primordiales.**

Tout d'abord, il est nécessaire de réaliser un diagnostic précis, afin de disposer de données d'entrées précises, détaillées et réalistes.

Ensuite, après réalisation d'une modélisation forfaitaire démontrant le risque d'impact, il est nécessaire de réaliser une modélisation détaillée des transmissions vibratoires, afin de prendre en compte le caractère dynamique de la problématique.

Finalement, le seul dimensionnement d'un traitement vibratoire ne permet pas de garantir l'atteinte des objectifs vibratoires. En effet, la qualité de la mise en œuvre de ces éléments très techniques est primordiale pour l'atteinte des objectifs. Afin d'assurer qu'un tel investissement financier permet d'atteindre les objectifs (limitation de la gêne des futurs occupants, notamment), chacune des étapes du suivi des travaux de mise en œuvre des dispositifs anti vibratiles doit être réalisée.

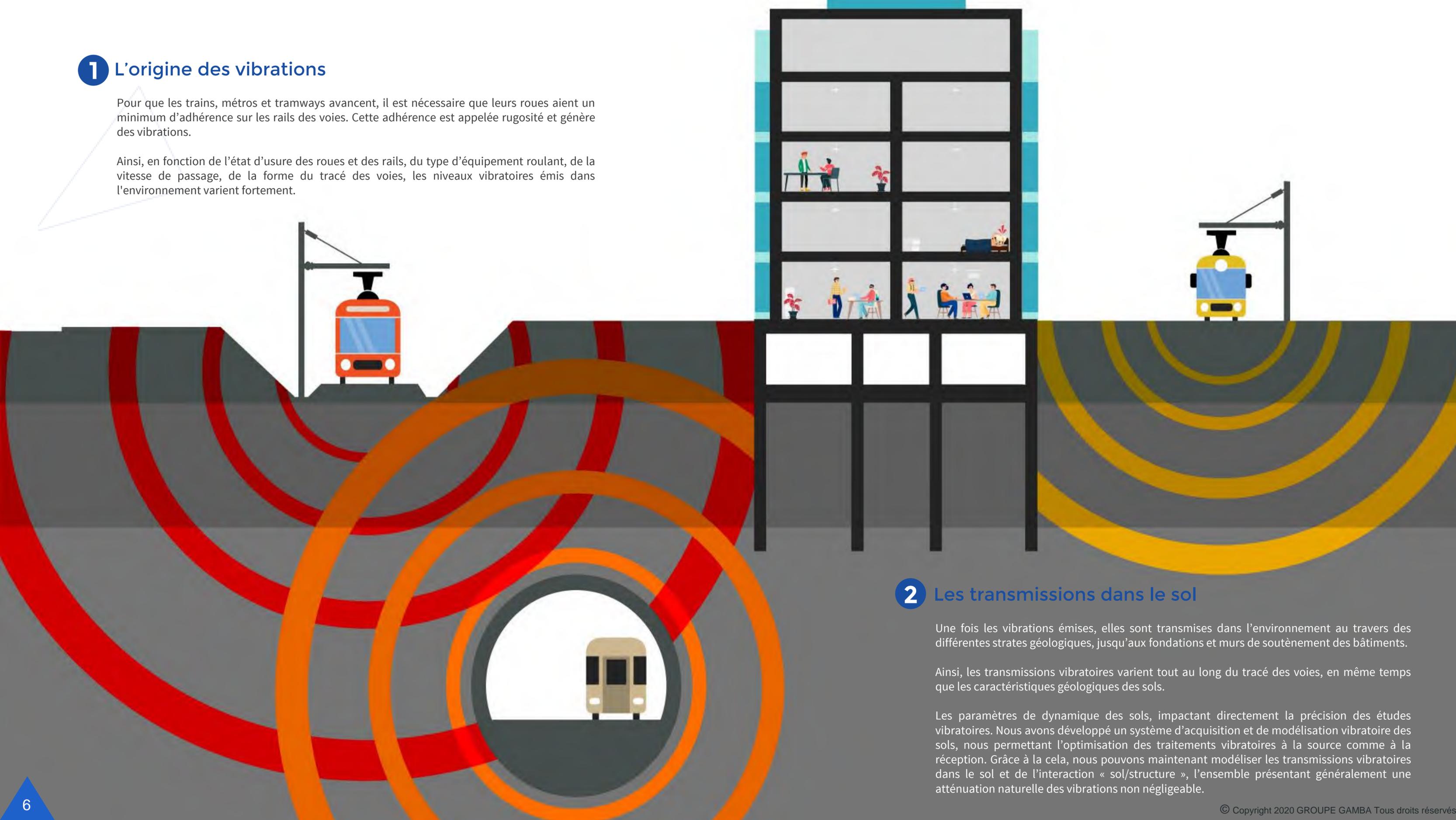


L'origine des vibrations

1 L'origine des vibrations

Pour que les trains, métros et tramways avancent, il est nécessaire que leurs roues aient un minimum d'adhérence sur les rails des voies. Cette adhérence est appelée rugosité et génère des vibrations.

Ainsi, en fonction de l'état d'usure des roues et des rails, du type d'équipement roulant, de la vitesse de passage, de la forme du tracé des voies, les niveaux vibratoires émis dans l'environnement varient fortement.



2 Les transmissions dans le sol

Une fois les vibrations émises, elles sont transmises dans l'environnement au travers des différentes strates géologiques, jusqu'aux fondations et murs de soutènement des bâtiments.

Ainsi, les transmissions vibratoires varient tout au long du tracé des voies, en même temps que les caractéristiques géologiques des sols.

Les paramètres de dynamique des sols, impactant directement la précision des études vibratoires. Nous avons développé un système d'acquisition et de modélisation vibratoire des sols, nous permettant l'optimisation des traitements vibratoires à la source comme à la réception. Grâce à la cela, nous pouvons maintenant modéliser les transmissions vibratoires dans le sol et de l'interaction « sol/structure », l'ensemble présentant généralement une atténuation naturelle des vibrations non négligeable.



3 Les transmissions dans les bâtiments

Une fois les fondations du bâtiment misent en mouvement, les planchers et murs se mettent alors eux aussi à vibrer.

Sans traitement, l'ensemble de la structure du bâtiment sera alors impacté. Un exemple de transmission vibratoire non atténuée a lieu dans les bâtiments collectifs, lorsqu'un voisin perce dans un mur en béton à l'autre bout d'une résidence de logement et qu'il vous réveille. En effet, les atténuations vibratoires par la structure porteuse d'un bâtiment sont extrêmement faibles.

Pire, la **dynamique des structures** d'un bâtiment est telle que les vibrations sont inévitablement amplifiées (qu'il y ait un traitement ou non).

4 Le bruit des vibrations

Une fois les planchers et murs mis en mouvement, ils « rayonnent » alors inévitablement et génèrent donc des **bruits solidiens**.

Car, comme la feuille de papier que l'on entend lorsqu'elle est mise en mouvement, ou le diapason que l'on entend uniquement lorsqu'il est mis en contact avec une paroi, la vibration des planchers et murs génère alors un champ acoustique audible dans les locaux, on entend alors le « grondement » des vibrations.

5 La gêne des occupants

Le bruit solidien est un bruit sourd, aussi régulier que la fréquence de passage des équipements roulants. Il vous réveille dans le calme de la nuit et vous fait lever la tête lorsque vous travaillez.

C'est ce bruit qui, à la longue, à force de répétition, obnubile les occupants, devient alors invivable pour certaines personnes. On parle alors de gêne.

Un exemple de bruit solidien est présent dans de nombreux hôtels parisiens: le grondement du métro que l'on entend, alors qu'il est souterrain.



Le cadre réglementaire

À ce jour, il n'existe pas de réglementation nationale spécifique concernant les vibrations générées par les infrastructures de transports terrestres qui sont transmises dans les bâtiments.

Néanmoins et pour information, cela devrait évoluer d'ici 2021, la loi mobilités votée en septembre 2019 à l'Assemblée Nationale demandant initialement la définition de seuil d'ici fin 2020.

Dans tous les cas, il est à noter que la proximité directe de projet avec les voies de trains, métros ou tramways, induit une très forte possibilité de gêne des futurs occupants, notamment un risque élevé de trouble du sommeil et de la concentration. Selon une étude de l'Organisation Mondiale de la Santé, ces troubles induisent même une réduction directe de l'espérance de vie.

Dans ce cadre, nous profitons de la situation actuelle et vous présentons généralement les résultats de nos études en fonction de trois niveaux de « standing ». Ainsi, en fonction du niveau de prestation que vous souhaitez pour votre projet, nous vous accompagnons pour choisir un objectif viable financièrement et commercialement.



Les traitements vibratoires

AVANT-PROPOS

Nous disposons depuis plusieurs décennies de globalement trois catégories de traitements vibratoires côté bâtiment.

Les traitements par boîte à ressort, qui correspondent toujours aux traitements les plus performants disponibles, mais qui sont aussi les plus onéreux.

Les traitements par plots ou bandes élastomères, qui présentent dans la majorité des cas, une performance suffisante pour assurer les confort des utilisateurs, tout en présentant un coût bien moindre (divisé par 3 généralement).

Les traitements par tapis élastomère ou non, qui peuvent présenter des performances suffisantes dans certains cas, on l'avantage de ne pas modifier la structure du projet dans le cas de fondations superficielles de ce dernier. Toutefois, l'inconvénient non négligeable concerne l'impossibilité de déterminer précisément où se trouve le « pont vibratoire » en cas problème à la réception (le traitement n'étant plus visible et accessible avec coulage de la structure).

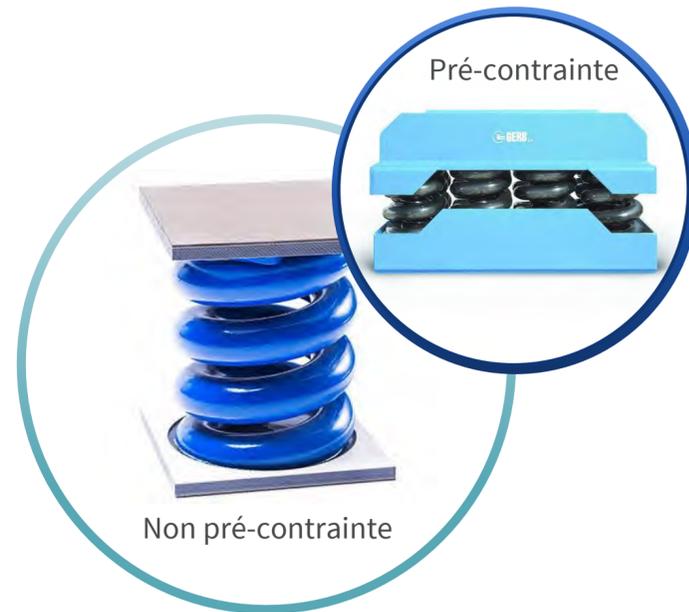
Les avancées techniques et technologiques de ces dix dernières années nous permettent maintenant de dimensionner deux solutions complémentaires « sans coupure vibratoire ».

Dans une majorité de cas, seulement une partie des bâtiments ou halls d'une opération sont directement impactés par la source vibratoire. Ainsi, il est maintenant possible de quantifier le gain apporté par la création d'un joint de dilatation toute hauteur (fondations comprises) entre deux parties d'un projet perpendiculaire à des voies. On parle dans ce cas d'**effet d'écran vibratoire**.

De plus, la réalisation des modélisations vibratoires par éléments finis a permis d'intégrer précisément l'influence de la réponse dynamique de la structure des projets dans les résultats. Dans certaines configurations (pas les plus exposées), nous arrivons maintenant à nous passer de système de désolidarisation, en limitant uniquement les amplifications structurelles des vibrations.

Les différents traitements vibratoires

Les boîtes à ressorts



Performance vibratoire



Coût



Risque d'erreur de mise en oeuvre



Mise en œuvre possible :

En plancher haut du sous-sol

En tête de fondation

Les plots et bandes en élastomère



Performance vibratoire



Coût



Risque d'erreur de mise en oeuvre



Mise en œuvre possible :

En plancher haut du sous-sol

En tête de fondation

Les tapis en élastomère et caoutchouc



Performance vibratoire



Coût



Risque d'erreur de mise en oeuvre



Mise en œuvre possible :

Autour du bâtiment

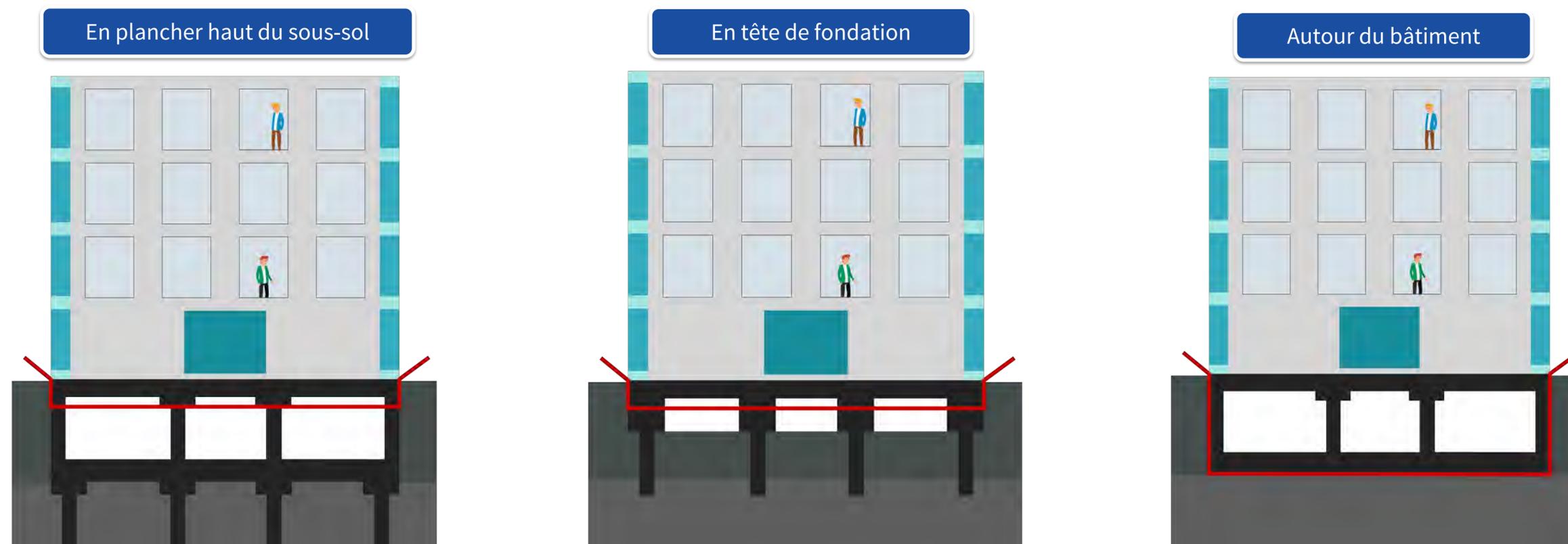
Les mises en œuvres possibles

Globalement, il existe 3 positions pour la coupure vibratoire:

- **Autour du bâtiment** : applicable dans le cas de la mise en œuvre d'un tapis élastomère. Cette solution présente l'avantage de ne pas modifier la structure du projet, mais l'inconvénient d'une performance limitée et d'une impossibilité d'identifier précisément la localisation des ponts vibratoires en cas d'erreur de réalisation.

- **En tête de fondation** : applicable dans le cas de la mise en œuvre de boîtes à ressort et plots ou bandes élastomères. Cette solution est selon nous uniquement intéressante en cas d'absence de sous-sol, car il est fortement conseillé de réaliser un vide sanitaire (onéreux) pour pouvoir réceptionner visuellement la coupure après coulage des planchers.

- **En plancher haut du sous-sol** : applicable dans le cas de la mise en œuvre de boîtes à ressorts et plots ou bandes élastomères. Par expérience, la coupure vibratoire en plancher haut du sous-sol, reste actuellement le moyen le plus sûr, car la coupure vibratoire reste majoritairement accessible. Il est aussi potentiellement le moyen le plus intéressant financièrement, car des optimisations sont possibles dans la majorité des cas.



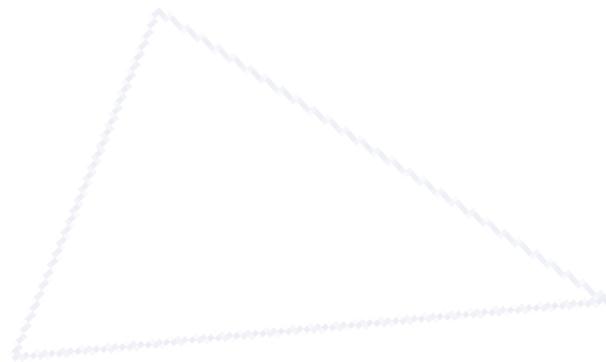
Une solution sans traitement – L'effet d'écran vibratoire

Les avancées techniques et technologiques de ces dix dernières années nous permettent maintenant de dimensionner deux solutions complémentaires « sans coupure vibratoire ».

Dans une majorité de cas, seulement une partie des bâtiments ou halls d'une opération sont directement impactés par la source vibratoire. Ainsi, il est maintenant possible de quantifier le gain apporté par la création d'un joint de dilatation toute hauteur (fondations comprises) entre deux parties d'un projet perpendiculaire à des voies.

Dans certains cas, il est même possible d'optimiser le traitement des bâtiments situés en vue directe des voies. Ils profitent d'effets d'écrans vibratoires apportés par des superstructures ou infrastructures rendues indépendantes et situées entre les voies et les parties « à protéger » du projet.

Ce type de solution présente des gains financiers très importants, car il suffit généralement d'ajouter une rangée de fondations supplémentaire, ce qui est, dans la majorité des cas, moins impactant financièrement qu'une désolidarisation complète du projet ou une désolidarisation par boîte à ressorts.



Une solution sans traitement –

La diminution des amplifications structurelles

La réalisation des modélisations vibratoires par éléments finis permet d'intégrer précisément l'influence de la réponse dynamique de la structure des projets dans les résultats. Ainsi dans certaines configurations, nous arrivons maintenant à nous passer de système de désolidarisation, en limitant uniquement les amplifications structurelles des vibrations.

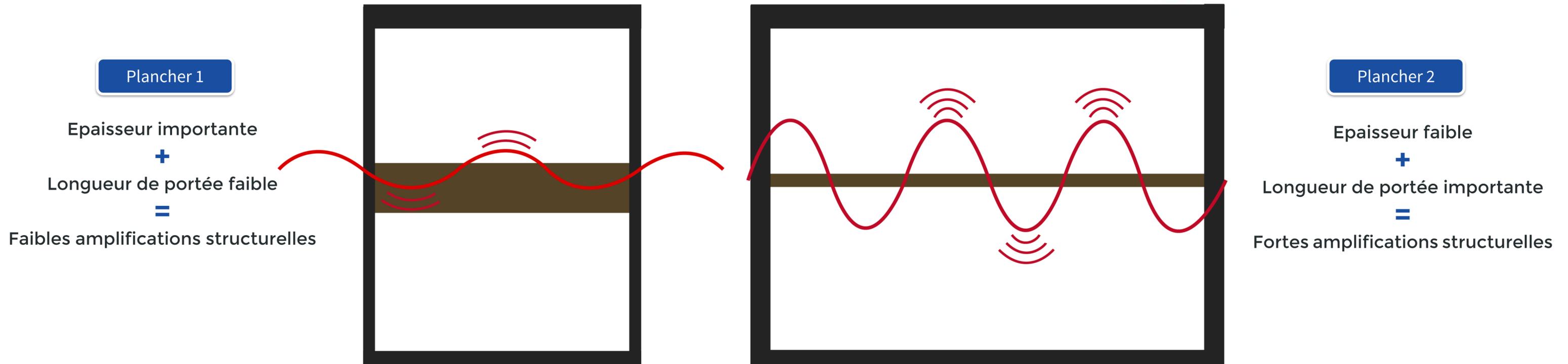
Cela dépend de plusieurs facteurs:

- **L'exposition vibratoire du projet:** si l'impact vibratoire est trop important, une coupure vibratoire ne peut pas toujours être évitée.
- **La forme géométrique du projet:** certains projets présentent des réponses dynamiques plus ou moins favorables,
- **Les systèmes constructifs du projet:** il est actuellement plus simple d'optimiser un bâtiment tout béton qu'un bâtiment en structure légère.
- **L'organisation des locaux et les longueurs de portée des planchers:** Une balance économique et organisationnelle est nécessaire pour déterminer si les contraintes apportées par la réduction des longueurs de portée des planchers est viable vis-à-vis du gain performantiel.

Ce qu'il faut retenir

Plus un plancher présente une masse faible et une longueur de portée importante, plus il amplifiera les vibrations en fonction de ces modes structurels dynamiques.

Ainsi en travaillant sur l'inertie et la rigidité d'un projet, on arrive dans certains cas à se passer de coupure vibratoire.





L'optimisation des traitements



AVANT-PROPOS

Les enjeux financiers dus à un impact vibratoire sur une opération immobilière étant non négligeable, et le marché de la construction nécessitant le prix le plus juste, **l'optimisation de la performance des traitements vibratoires est devenue depuis plusieurs années primordiale.**

Cela est maintenant possible du fait des avancées techniques et technologiques. Ainsi, sur la base de thèses en partenariat avec des laboratoires, nous avons développé les outils pour mesurer et modéliser le comportement vibratoire des sols. Dans le même temps, les capacités de calcul ont suffisamment évoluées et augmentées, pour réaliser des modélisations par éléments finis en un temps record: 1 à 3 jours en moyenne par configuration au lieu de 2 à 3 mois il y a plus de dix ans.

Ces éléments rendent maintenant possible l'optimisation des traitements, dès leurs dimensionnements en conception ou même en phase de préparation de chantier avec les entreprises.

Le but de ce type de prestation est simple: **mettre en œuvre seulement les traitements qui sont nécessaires.**

Ainsi:

- 90% de nos projets désolidarisés le sont uniquement par plots élastomères (légèrement moins performants, mais beaucoup moins onéreux)
- 10% de nos projets désolidarisés sont sur boîtes à ressorts, car nous ne sommes pas magicien, si les niveaux vibratoires sont trop élevés, il peut toujours être nécessaire de mettre en œuvre ce type de traitement. Les boîtes à ressorts sont non précontraintes dans la quasi-totalité de ces cas (solution moins onéreuse, mais aussi performante).
- 90% des bâtiments situés en deuxième plan par rapport aux voies ne sont pas désolidarisés. La première ligne de bâtiment protégeant quasi systématiquement la deuxième.

Les économies réalisées avec ce type de prestation, couvrent largement le coût de l'étude et du suivi de chantier spécifique qui en découle nécessairement.

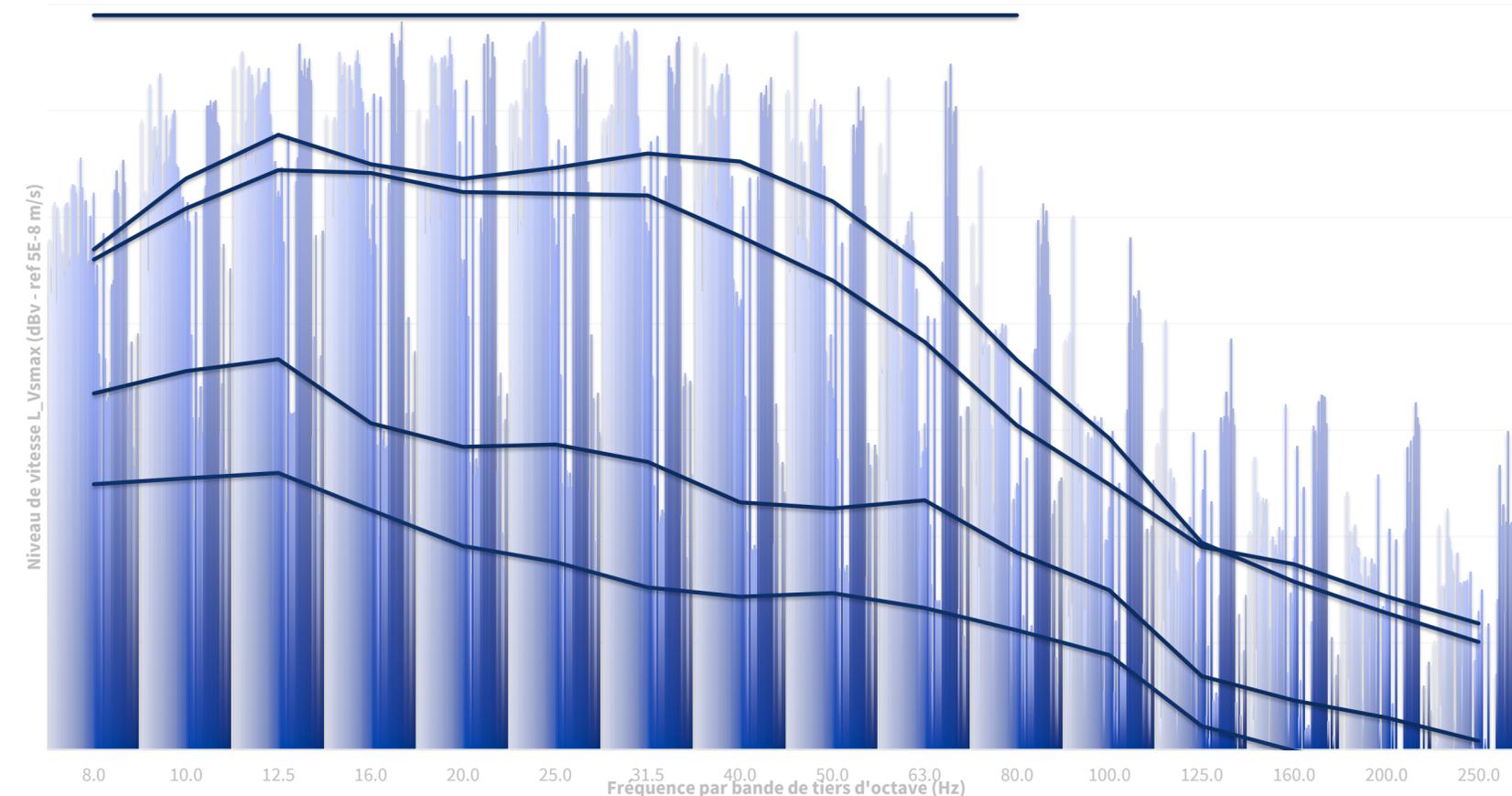
Les données d'entrées

La réalisation d'un nouveau diagnostic vibratoire insitu est le premier élément déterminant pour l'optimisation d'une coupure vibratoire.

Car, au-delà de la maîtrise de la variabilité des niveaux vibratoires due aux différents types d'équipements roulants et aux passages sur différentes voie, il est aussi primordial de maîtriser l'incertitude de la chaîne d'acquisition et d'analyse.

De plus, bien souvent quand on intervient dans le cadre d'optimisations vibratoires, les parcelles des projets sont souvent accessibles et nettoyées des précédentes constructions. Nous pouvons ainsi réaliser des points de mesures en champ libre et à l'emplacement exact des pieds de façade des futurs bâtiments.

Finalement, les évolutions technologiques et l'augmentation de notre parc matériel ont fortement augmenté notre capacité de mesure et ainsi notre précision de diagnostic. Car à l'inverse de l'acoustique, où l'on rencontre une certaine homogénéité des niveaux acoustiques d'un point à un autre (à distance équivalente de la source et sur la même parcelle), en vibration, les variations géologiques et d'éléments sous terre induisent potentiellement de très fortes variations des niveaux mesurés. C'est pourquoi, dans le cadre d'optimisation vibratoire, nous réalisons systématiquement un diagnostic aussi conséquent que nécessaire, pour être en adéquation avec les enjeux techniques et financiers.

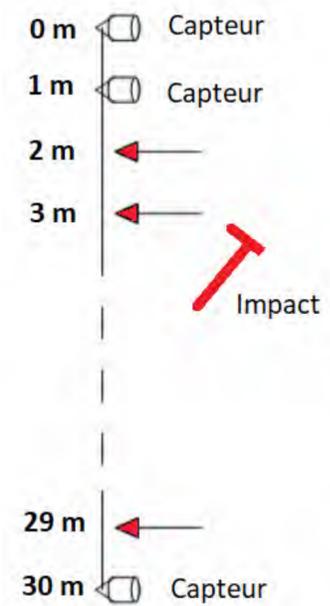
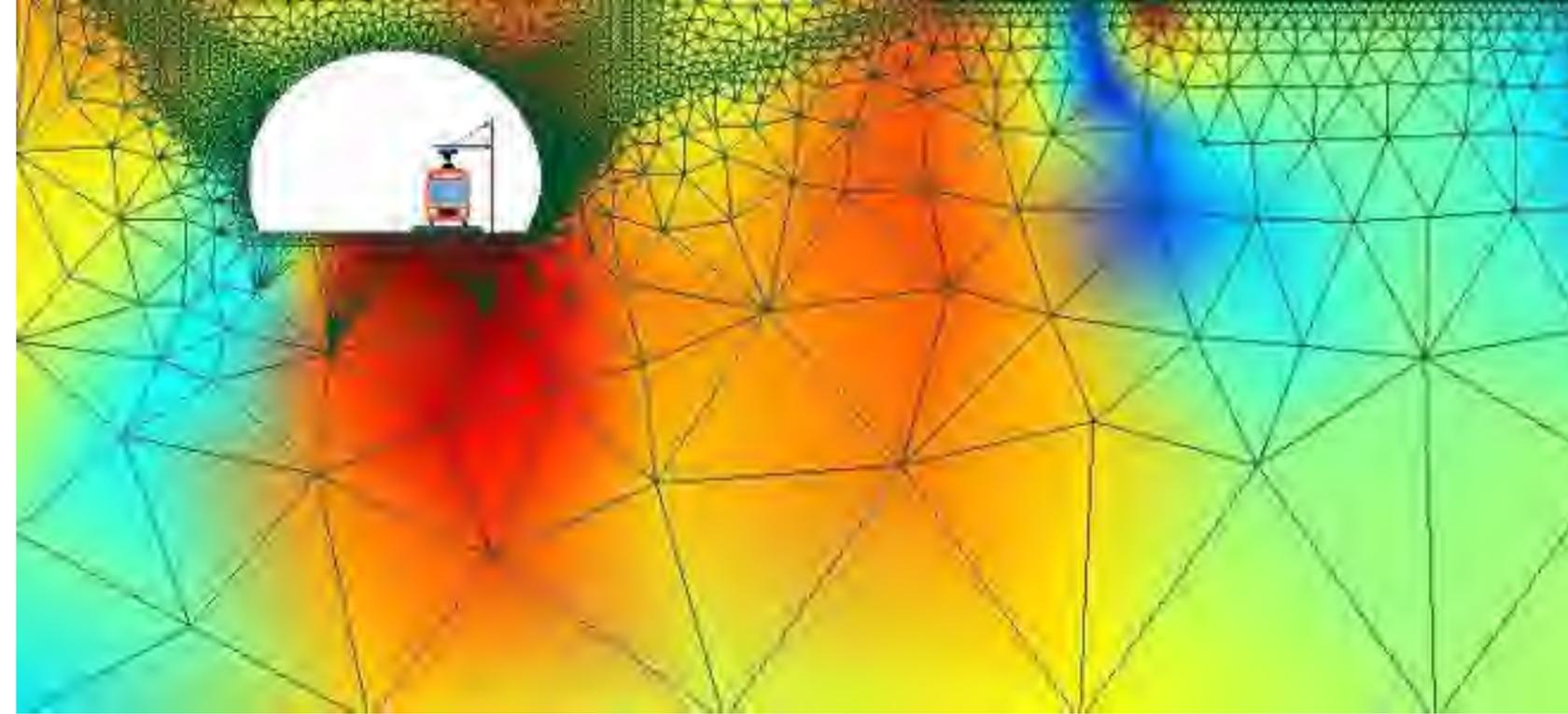


La caractérisation vibratoire du sol

Ce nouveau type de mesure est issu de près de 10 ans de recherche & développement interne et deux thèses, afin de rendre la mesure précise et rapide.

Elle est basée sur la méthode appelée « MASW » et maintenant intégrée à la norme internationale SO 14 837-32.

Cette mesure est non destructive et met en général 1h à être réalisée. Le gain en précision de nos études vibratoires est principalement basé sur les données obtenues grâce à cette mesure.



Le principe est basé sur la mesure simultanée des niveaux vibratoires et de la force injectée tous les mètres par une masse instrumentée.

Après dépouillement et analyse des mesures, une modélisation vibratoire du sol est réalisée afin de déterminer les paramètres dynamiques tels que la célérité des ondes de cisaillement et dilatation, ainsi que l'amortissement, ou encore la masse volumique et l'épaisseur de chaque strate géologique.

C'est une technologie unique aux utilisations multiples:

- La validation des variations potentielles des niveaux vibratoires entre les points de mesure, grâce à la connaissance de la géologie de la parcelle.
- La modélisation précise des transmissions vibratoires dans le sol,
- La modélisation précise des interfaces sols/structures,

Les modélisations vibratoires par éléments finis

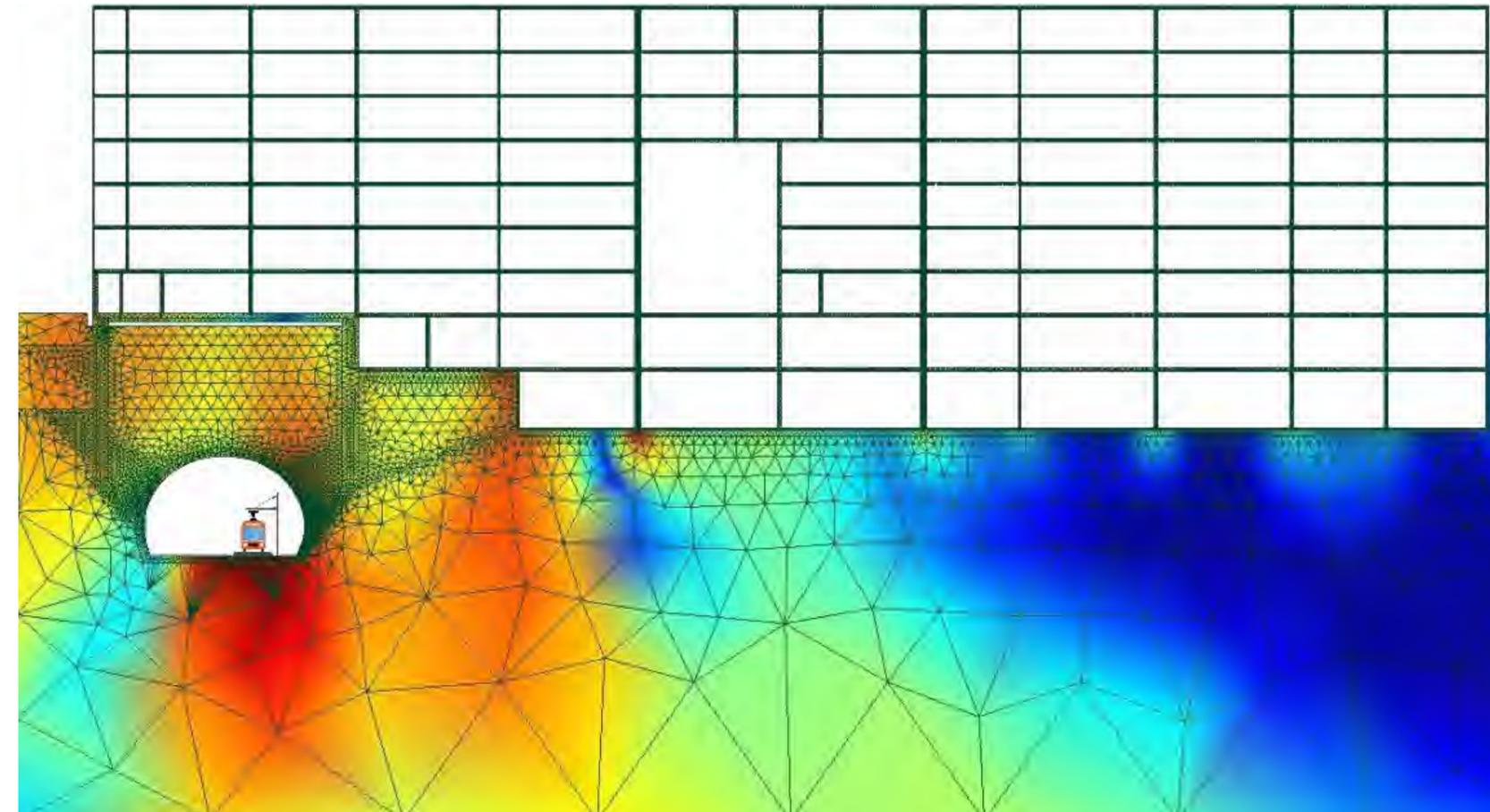
Les modélisations vibratoires par éléments finis intègrent le caractère dynamique des transmissions dans le sol et les structures. Elles permettent de prendre en compte: les phénomènes vibratoires, l'interface entre le sol et la structure, les amplifications structurelles dues à la réponse dynamique des structures et les réflexions potentielles sur certaines strates géologiques.

La majorité des phénomènes vibratoires sont alors inclus dans une seule modélisation. L'incertitude de modélisation est donc fortement réduite par rapport aux solutions de modélisation « forfaitaire », qui, elles, sont basées sur des représentations d'un projet nécessairement simplifié et non le projet réel. (Les modélisations forfaitaires sont pour autant bien plus rapides et souvent judicieuses en première approche dans le cadre d'étude d'impact vibratoire).

La diminution des incertitudes de modélisation, induit nécessairement de commencer par modéliser chaque projet sans traitement vibratoire. Car il n'est pas rare que l'atteinte des objectifs de confort des futurs utilisateurs, ne nécessite qu'une adaptation de la structure du projet pour réduire les amplifications structurelles.

Bien sûr, les solutions sans traitement vibratoire ne sont pas toujours possibles. Les configurations les plus défavorables et avec des niveaux vibratoires trop élevés nécessiteront une coupure vibratoire pour traiter le problème.

Dans les autres cas, il est alors nécessaire de dimensionner et optimiser la performance intrinsèque des traitements vibratoires. Car il est à noter, que la réponse dynamique des éléments structurels en amont et aval de la coupure vibratoire, induit nécessairement une détérioration des performances globale de la coupure. C'est alors que toute notre expertise en terme de dynamique des structures et des matériaux intervient pour trouver le meilleur compromis afin d'assurer le confort des futurs utilisateurs, en limitant tant que possible l'impact sur le budget de l'opération. Un savoir unique fort de nombreuses années d'expérience.



Etude de cas

25.0 31.5 40.0 50.0 63.0 80.0
Fréquence par bande de tiers d'octave (Hz)



Etude de cas – L’optimisation d’un projet de 200 logements

LE CONTEXTE

La réalisation d’une étude d’optimisation vibratoire d’un projet est une aventure technique, dont nos ingénieurs ne peuvent se lasser. Pour cette opération de 200 logements, nous avons réalisé l’étude en un temps record au vu de la taille du projet (moins d’un mois et demi entre la commande et la confirmation de la faisabilité de l’optimisation).

Initialement, il était prévu sur l’ensemble des bâtiments un traitement vibratoire par plots élastomères et boîtes à ressorts précontraintes. Nous avons été contactés dans un but simple : faire des économies pour rendre le projet réalisable. Notre métier est de concevoir des bâtiments, mais notre but est surtout d’arriver à ce que les projets voient le jour. Sinon tout le monde est perdant, les futurs utilisateurs comme les concepteurs.

LE DIAGNOSTIC

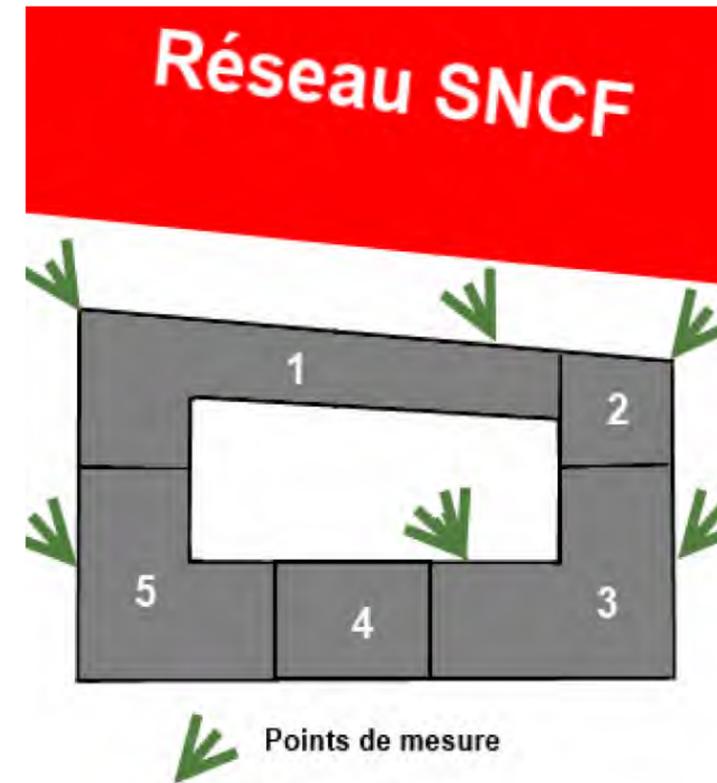
Il s’agit d’un projet long de plus de 100 m par 40 m, situé le long d’un réseau ferroviaire d’une grande ville, avec un trafic très important. Nous avons tout d’abord réalisé un diagnostic vibratoire complémentaire, comprenant la mesure des niveaux vibratoires aux passages des trains en 6 points simultanés et des mesures de caractérisation vibratoire du sol.

Généralement nous réalisons les études d’optimisation vibratoires en fin de phase DCE ou en EXE. L’inconvénient est que les modifications structurelles pour travailler sur la réponse dynamique de la structure doivent généralement se limiter aux zones non habitables. Mais l’avantage est que la parcelle du projet est généralement nettoyée de ces précédents bâtiments.

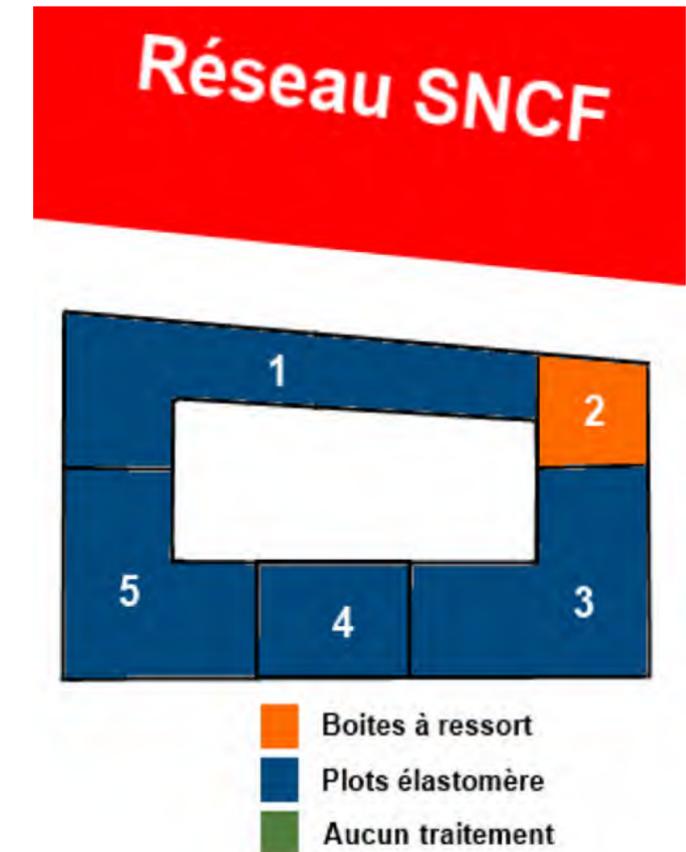
Le diagnostic peut donc être réalisé en champ libre et en lieu et place des futurs pieds de façade, ce qui apporte un gain non négligeable sur la précision des données d’entrées.

Dans tous les cas, la maîtrise de l’incertitude sur les données d’entrées est le premier élément clef de la réussite d’une optimisation.

Le diagnostic



Le traitement initialement prévu



Etude de cas – L'optimisation d'un projet de 200 logements

LES MODELISATIONS VIBRATOIRES

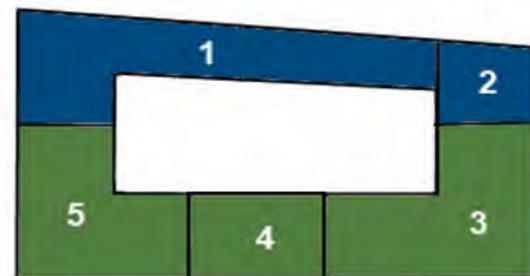
Pour cette mission, 3 configurations ont été modélisées par éléments finis, et cela pour deux géologies de sol (du fait de la présence d'une nappe d'eau sub-afléurante une partie de l'année induisant une modification des caractéristiques dynamiques des strates géologiques dont une variation des transmissions vibratoires.)

Dans le cas de l'extrait de modélisation présenté ici, on peut observer la précision du maillage par éléments finis, ainsi que les phénomènes d'interactions vibratoires entre les deuxième et troisième strates géologiques.

L'intérêt de ce type de modélisation dans le cas présent est multiple :

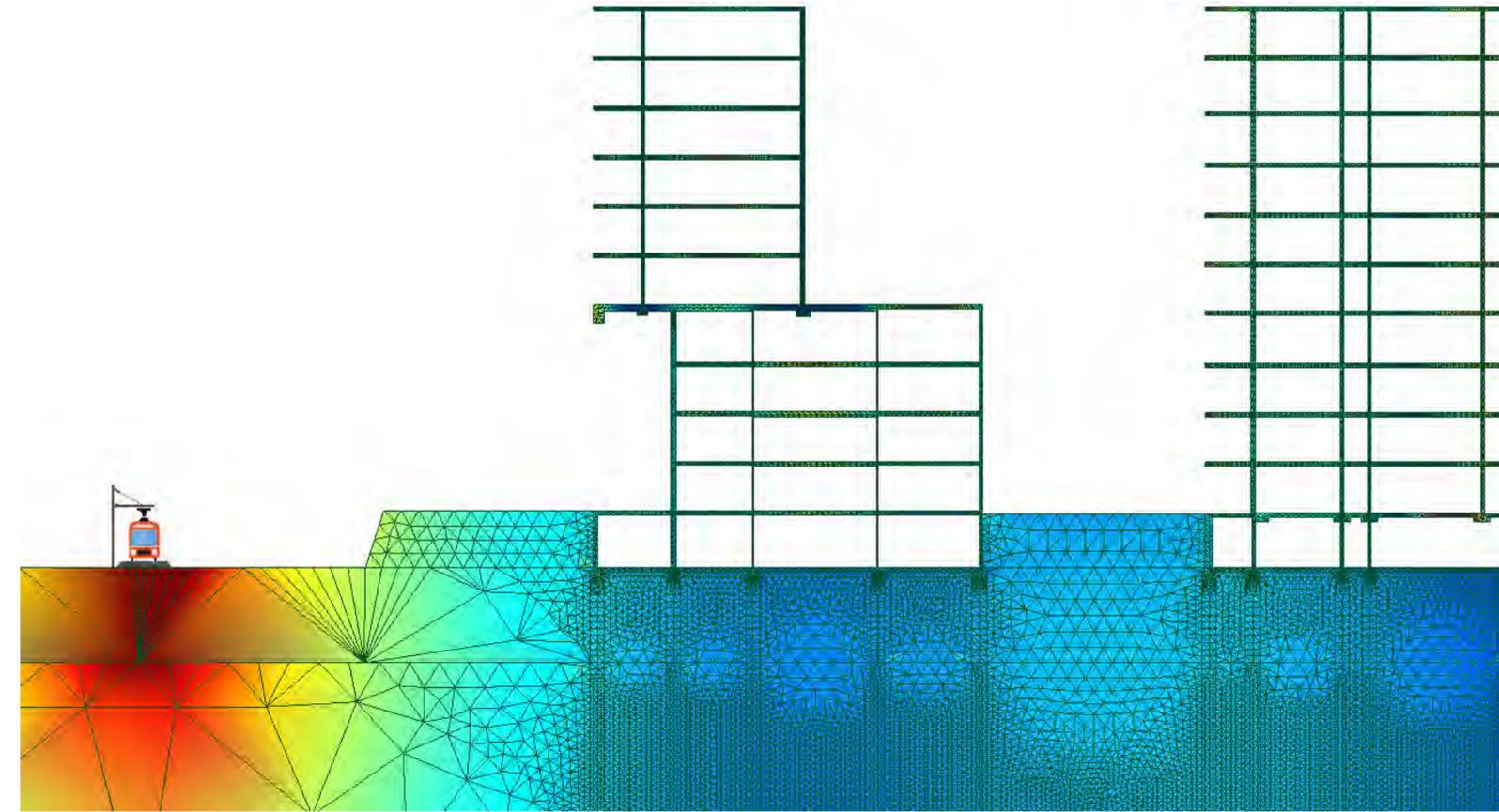
- Prendre en compte précisément les atténuations vibratoires entre le sol et les fondations,
- Prendre en compte les futures transmissions vibratoires entre la première couche de sol (rapportée) et le projet,
- Prendre en compte l'effet d'écran vibratoire des bâtiments n°1 et 2 sur les bâtiments n° 3, 4 et 5.

Traitement optimisé



- Boites à ressort
- Plots élastomère
- Aucun traitement

Gain financier



LE RESULTAT

Après 1 semaine de diagnostic et dépouillement, puis plus de 3 semaines de modélisation, nous avons pu confirmer notre intuition initiale, à savoir : il était bien possible de ne traiter que moins de la moitié du projet, et un traitement par plots élastomères pouvait suffire à assurer le confort des futurs utilisateurs.

Une réussite pour l'entreprise qui nous a contacté, le maître d'ouvrage qui arrivera à réaliser son projet et nous. Une belle optimisation d'environ 400 000€.





L'importance du suivi de chantier

Que la coupure vibratoire soit en boîtes à ressorts, plots ou bandes élastomère, les tolérances de réalisation restent plus élevées que les standards gros œuvre habituels.

Ce qu'il est primordial de comprendre, c'est qu'un « téton » de béton, une ferraille ou une cale en bois de calage, contraint le mouvement dynamique de la superstructure. Et crée un pont vibratoire direct entre les parties non désolidarisées et exposées d'un bâtiment (généralement situées en infrastructure), et les parties désolidarisées d'un bâtiment situé en superstructure.

En acoustique le principe est qu'un simple petit trou dans une paroi séparative entre deux locaux, créera un « pont phonique » détériorant fortement l'isolement au bruit aérien entre ces deux locaux. Dans le cas d'un « pont vibratoire », l'objectif vibro-acoustique ne sera pas atteint dans seulement 2 mais peut être 5 ou 10 locaux. L'ensemble des locaux, tout étage confondu, sera impacté par ce contact de quelques centimètres.

Nos réussites



📍 CHATENAY
MALABRY



📍 NOISY LE GRAND



📍 PONTOISE



📍 BORDEAUX



📍 MASSY



📍 SAINT-DENIS

🏠 boîte à ressort précontrainte

🏠 plot élastomère

🏠 bâtiments non désolidarisés

🏠 boîte à ressort non précontrainte

Pour aller plus loin

Pour en savoir plus sur les vibrations dans les bâtiments, contactez-nous pour organiser avec votre équipe une présentation plus complète par visioconférence (30 min de présentation, 30 min de question, 5 à 10 personnes souhaitées)

Pour toute demande et analyse de risque d'impact vibratoire (gratuit), [c'est par ici](#).

