

# SonoShield

Barrière innovante contre les nuisances sonores ferroviaires



Par Adrien Beauclair, Jules Chandelier, Rayan Chennaoui et Nima Kashani  
IPSA 2023-2024 – AERO 2 – ENCADRE PAR M. SAATDJIAN

## **Avertissement**

Le présent rapport utilise des informations provenant de sources externes, y compris des sites web, des études et des données fournies par diverses associations. Nous tenons à souligner que toutes les sources ont été mentionnées conformément aux règles de droits d'auteur et que les contributions des auteurs originaux sont reconnues. Toute utilisation de ce rapport à des fins de reproduction ou de distribution doit respecter les droits de propriété intellectuelle des sources citées. Par ailleurs, l'utilisation de ces données a été autorisée par les parties concernées ou est conforme aux conditions d'utilisation énoncées par ces sources.

## **Remerciements**

Nous tenons à exprimer notre gratitude à toutes les personnes et organisations qui ont contribué à la réalisation de ce projet d'intérêt général.

Tout d'abord, nous remercions chaleureusement M. Saatchian, notre professeur, pour son soutien continu et ses conseils précieux. Sa disponibilité et ses orientations ont été déterminantes pour le bon déroulement du projet. Nous adressons nos remerciements à Rim Debel, ingénieure chez Riversen, pour ses précieux renseignements concernant les options de financement du projet. Ses conseils nous ont permis de mieux appréhender les aspects économiques et financiers de notre travail.

Enfin, nous tenons également à remercier Charlotte Deboque, directrice adjointe au cabinet du Département du Nord, Stéphanie Parent, architecte de l'entreprise Atelier Blanc, et Léonard Pecquet, ingénieur acousticien chez Euro D.B Acoustique, pour la signature de notre fiche de validation technique et sociétale et pour leurs précieux conseils sur le choix des matériaux et des structures. Nous exprimons notre reconnaissance à l'Association Bruitparif, l'observatoire du bruit en Île-de-France, qui nous a autorisés à utiliser les données de ses études sur les nuisances ferroviaires.

# Déclaration anti-plagiat

**Auteurs** du rapport :

Adrien BEAUCLAIR, Jules CHANDELIER, Rayan CHENNAOUI, Nima KASHANI

- Nous déclarons que ce rapport résulte de notre travail collectif et que nous seuls pouvons en revendiquer la conception et la rédaction.
- Nous avons conscience que nul ne peut s'approprier les écrits d'autrui sans contrevenir aux lois régissant la propriété intellectuelle.
- Les données que nous avons pu emprunter à autrui figurent entre guillemets.
- Toutes les sources que nous avons utilisées sont référencées dans notre bibliographie-webographie.
- Tous les documents d'illustration qui étayent notre propos (captures vidéo, cartes, infographies, photos, vues d'artistes, etc.), libres de droits ou non, sont assortis du nom (©) de leur auteur.

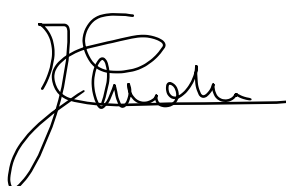
Date : Le 06 décembre 2023

Signatures :

Adrien BEAUCLAIR



Jules CHANDELIER



Rayan CHENNAOUI



Nima KASHANI



# Table des matières

Avertissement.....	1
Remerciements.....	1
Déclaration anti-plagiat.....	2
Glossaire.....	5
Liste des sigles et abréviations.....	6
<b>Fiche de synthèse.....</b>	<b>7</b>
Avis sociétal.....	8
Avis technique.....	9
<b>I. Introduction.....</b>	<b>10</b>
<b>II. Contexte.....</b>	<b>11</b>
A. Histoire du développement ferroviaire.....	11
Historique du développement ferroviaire français.....	11
Situation ferroviaire actuelle.....	12
B. La question du bruit ferroviaire.....	12
Importance de problème du bruit de nos jours.....	12
Étude de perception du bruit.....	13
Caractéristiques géographiques et urbaines.....	15
C. Contraintes et Enjeux.....	16
Contraintes réglementaires liées au bruit ferroviaire.....	16
Conséquences environnementales.....	17
D. État de l'art des barrières anti-bruit.....	18
Revue des technologies actuelles de barrières anti-bruit.....	18
La nécessité d'améliorer les barrières anti-bruit.....	19
<b>III. Modalités d'application.....</b>	<b>20</b>
A. Matériaux et analyse de résistance.....	20
Choix des matériaux.....	20
Etude résistance des matériaux.....	22
B. Modélisations et dimensions.....	24
Modélisation 2D.....	24
Définition des dimensions.....	25
Modélisation 3D.....	27

C. Technologie ANC et tests .....	29
Définition de la technologie ANC .....	29
Intégration de la technologie ANC au projet .....	31
Programme Python .....	36
Tests et résultats .....	38
<b>IV. Budget prévisionnel.....</b>	<b>41</b>
Estimation des coûts.....	41
Financement .....	41
Rentabilité .....	42
<b>V. Conclusion.....</b>	<b>45</b>
<b>VI. Réponses aux objections attendues.....</b>	<b>47</b>
Bibliographie-Webographie.....	49
Table des illustrations .....	52

# Glossaire

(1) **Matériaux avancés** : Désigne des matériaux ayant des propriétés spécifiques, souvent développés grâce à des techniques de pointe, comme des matériaux composites ou des alliages spéciaux.

(2) **Annulation active du bruit** : Technologie qui utilise des signaux sonores inverses pour réduire ou annuler les bruits indésirables.

(3) **Matériaux absorbants** : Matériaux utilisés pour réduire la réflexion des sons en les absorbant, ce qui peut aider à atténuer le bruit.

(4) **Déplacements pendulaires** : Déplacements quotidiens des personnes entre leur domicile et leur lieu de travail ou d'étude.

(5) **Décibels** : Unité de mesure de l'intensité sonore.

(6) **Acouphènes** : Perception de bruits ou de sons dans les oreilles ou la tête, tels que des bourdonnements, des sifflements ou des cliquetis, sans source externe identifiable.

(7) **Dynamique sonore** : Caractéristiques du son dans un environnement donné, y compris les variations de bruit, les sources sonores et les niveaux sonores.

(8) **Urbanisation** : Croissance des zones urbaines en termes de population et de construction, souvent accompagnée d'une augmentation des sources de bruit.

(9) **État de l'art** : Revue complète des avancées technologiques et des solutions existantes dans un domaine spécifique.

(10) **Matériaux hydrofuges** : Matériaux qui résistent à l'humidité et empêchent la pénétration de l'eau.

(11) **Pare-vapeur** : Barrière utilisée pour empêcher la vapeur d'eau de pénétrer dans les structures, réduisant ainsi le risque d'humidité et de moisissures.

(12) **Limite d'élasticité** : Point à partir duquel un matériau cesse de se comporter de manière élastique (où la déformation est réversible) et commence à se déformer de manière irréversible.

(13) **Modélisation 2D/3D** : Processus de création de représentations visuelles de structures ou d'objets en deux ou trois dimensions.

<sup>(14)</sup> **CATIA V5R19** : Logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) utilisé pour la modélisation 2D et 3D, couramment employé dans l'industrie de l'ingénierie pour la conception technique.

<sup>(15)</sup> **Transformée de Fourier rapide (FFT)** : Méthode mathématique pour analyser les composantes fréquentielles d'un signal audio.

<sup>(16)</sup> **Transformée de Fourier inverse (IFFT)** : Procédé inverse de la FFT permettant de retransformer un signal traité dans le domaine temporel.

<sup>(17)</sup> **Points noirs du bruit ferroviaire** : Zones où les nuisances sonores liées au trafic ferroviaire sont particulièrement élevées, nécessitant des mesures d'atténuation.

## Liste des sigles et abréviations

PIG	Projet d'Intérêt Général
RER	Réseau Express Régional
ANC	Active Noise Cancellation
RATP	Régie Autonome des Transports Parisiens
TGV	Train à Grande Vitesse
dB	Décibel
JNA	Journée Nationale de l'Audition
AEE	Agence Européenne de l'Environnement
SNCF	Société nationale des chemins de fer français
©	Copyright

## Fiche de synthèse

**Qui ?** Le projet est mené par un groupe d'étudiants en 2<sup>e</sup> année d'école d'ingénieur spécialisée en aéronautique et spatial, développant des connaissances en acoustique, en matériaux avancés<sup>(1)</sup> et en modélisation 3D. Nous travaillons en collaboration avec des experts locaux, des autorités publiques et des entreprises ferroviaires pour concevoir des solutions innovantes afin de réduire les nuisances sonores liées aux activités ferroviaires.

**Où ?** Le projet se déroule dans la ville de Choisy-le-Roi, située dans le Val-de-Marne (94), en Île-de-France. Cette localisation a été choisie en raison de la proximité immédiate des résidences avec les voies ferrées de la gare RER C de Choisy-le-Roi. La zone connaît des niveaux de bruit significatifs en raison du trafic ferroviaire intense, ce qui crée des problèmes de qualité de vie pour les résidents locaux.

**Pourquoi ?** Le projet vise à résoudre le problème des nuisances sonores causées par le trafic ferroviaire dans des zones densément peuplées, comme Choisy-le-Roi. L'objectif est d'atténuer ces nuisances qui ont des effets négatifs sur la qualité de vie, la santé mentale et physique des résidents. Le projet répond également à la nécessité de respecter les normes réglementaires sur les niveaux de bruit et de protéger l'environnement contre les effets néfastes des vibrations et du bruit excessif.

**Quoi ?** Notre projet vise à concevoir des barrières anti-bruit innovantes pour atténuer les nuisances sonores du trafic ferroviaire. En utilisant des technologies avancées comme l'annulation active du bruit<sup>(2)</sup> (Active Noise Cancellation, ou ANC), ces barrières détectent et neutralisent les ondes sonores indésirables. Nous associons cette technologie à des matériaux absorbants<sup>(3)</sup> et résistants pour garantir la durabilité et l'efficacité. Ces barrières sont conçues pour s'intégrer harmonieusement dans des zones résidentielles.

**Comment ?** Pour atteindre cet objectif, le projet propose d'utiliser des techniques innovantes pour créer des barrières anti-bruit plus efficaces. Cela inclut l'utilisation de matériaux avancés, tels que les panneaux absorbants, et des technologies intelligentes pour ajuster dynamiquement l'atténuation sonore. Le groupe s'appuie sur des études de perception du bruit et des sondages pour recueillir des données sur les conséquences des nuisances sonores. Ces informations guident le développement de solutions techniques adaptées, visant à réduire les niveaux de bruit ferroviaire et à améliorer le confort acoustique des résidents. Les résultats attendus comprennent une réduction significative du bruit ferroviaire, une amélioration de la qualité de vie des résidents à proximité des voies ferrées et une meilleure conformité aux normes de bruit. Le projet vise également à contribuer à une approche durable de la gestion du bruit, en favorisant des solutions qui s'intègrent harmonieusement dans le paysage urbain.



## Avis sociétal

### Nom de la personne sollicitée

- Charlotte DEBOSQUE

### Titre auquel elle a été sollicitée et, le cas échéant, nom de l'entité qu'elle représente

- Élu(e) locale

### La solution technique est-elle adaptée à la situation ?

- ☐ pas tellement (*son acceptation sera difficile*)
- ☐ plutôt (*son acceptation sera possible après améliorations ou modifications*)
- ☒ tout à fait (*elle sera acceptée en l'état*)

- Justification de cet avis :

Le bruit est un élément particulièrement important dans la vie quotidienne, et encore plus en région parisienne. Les transports, qu'ils soient collectifs comme le train ou l'avion, ou individuels, tel que la voiture, en sont une des causes principales. En ce qui concerne les transports publics, afin qu'ils répondent aux besoins des usagers et qu'ils soient utilisés, ils doivent se situer à proximité des lieux d'habitation. Pour limiter les impacts sur l'environnement notamment, les pouvoirs publics développent en effet de plus en plus les transports en commun. Il faut ainsi trouver un équilibre entre proximité pour les usagers, et tranquillité des riverains.

### Appréciation de la solution technique :

- ☐ sans effet sur la situation de départ
- ☐ amélioration légère de la situation de départ
- ☒ amélioration significative de la situation de départ

- Justification de cet avis :

Il est du devoir des collectivités locales de trouver des solutions afin d'améliorer le bien-être des habitants. En prenant des mesures afin d'assurer le respect de la tranquillité d'autrui et d'améliorer le quotidien, les élus locaux, grâce aux mesures qu'ils prennent en lien avec l'Etat, le Département ou la Région, peuvent apporter des solutions innovantes. La technicité du projet présenté répond à cet objectif : tenir compte des nouvelles technologies pour proposer une solution plus adaptée.

### Recommandations :

- ☐ amender la solution envisagée
- ☒ poursuivre le travail avec la solution envisagée

- Remarques pour la suite du projet :

Il faut penser à l'esthétique du projet. Chacun a en tête les murs tagués aux descentes des trains. Le Street-art peut tout à fait être esthétique lors qu'il est maîtrisé (exemple de la ville de Porto). La végétalisation peut aussi être un moyen : il faut alors trouver des végétaux à croissance lente et avec peu d'entretien. La mise en place des différentes aides publiques montre que c'est un sujet d'intérêt général qui touche des villes françaises de plus en plus développées.

### Date et signature de la personne sollicitée

Le 2 mai 2024



## Avis technique

### Nom de l'expert ou du professeur de sciences sollicité

- Pecquet Léonard

### Spécialisation de l'expert ou du professeur de sciences sollicité

- Ingénieur acousticien

### Faisabilité technique du projet :

moyenne (*mise en œuvre difficile*)

**bonne** (*mise en œuvre possible après améliorations ou modifications*)

très bonne (*mise en œuvre possible en l'état*)

- Justification de cet avis :

Des paramètres structurels restent à déterminer. Déterminer la distance totale du mur

### Limites de la solution :

**l'état actuel des connaissances et de la recherche**

inefficacité

dangérosité (*santé, environnement, etc.*)

**coût**

- Justification de cet avis :

Au vu du nombre important de voies ferrées à l'emplacement localisé et de la proximité des habitations, la hauteur du mur ainsi que sa localisation précise (au plus proche des voies ferrées/des habitations/entre les deux), vont jouer un rôle très important dans la performance de protection. Ces paramètres restent à déterminer et auront un impact sur le cout du projet et la faisabilité technique (système de contreventement à prévoir, forme arrondie, casquette...)

### Recommandations :

abandonner la solution envisagée

**améliorer ou modifier la solution envisagée**

poursuivre le travail avec la solution envisagée

- Remarques pour la suite du projet :

Continuer les recherches et les réflexions sur des matériaux plus pérennes, plus efficace et moins couteux qu'un complexe en fibrolithe et ouate de cellulose (Verre, bois, béton...). Déterminer un cout total par mètre linéaire et le comparer avec celui d'autres complexe. Ce type de complexe peut être utilisé pour isoler des équipements extérieurs mais est-il adapté pour isoler des voies ferrés sur de grande distance ?

### Date et signature de l'expert ou du professeur de sciences sollicité

02/05/2024 - Léonard Pecquet

---

## I. Introduction

---

Le secteur ferroviaire joue un rôle fondamental dans la connectivité et la mobilité au sein de nos sociétés modernes. Cependant, l'effet sonore produit par les infrastructures utilisées, notamment aux abords des gares et des chemins ferrés, constitue un véritable problème en matière de qualité de vie pour les habitants et les communautés avoisinantes. Conscients de ce problème, nous nous sommes engagés dans un Projet d'Intérêt Général (PIG) qui vise à concevoir et améliorer des barrières anti-bruit innovantes.

L'objectif principal de ce projet est d'atténuer significativement les nuisances sonores produites par les activités ferroviaires, en particulier là où ces infrastructures cohabitent étroitement avec des zones résidentielles. L'importance de ce projet réside dans la volonté de concilier la croissance continue du transport ferroviaire avec le respect du bien-être des citoyens, tout en répondant aux enjeux environnementaux contemporains. De plus et afin d'y parvenir, nous avons effectué un sondage auprès d'un échantillon de 225 personnes environ qui nous permettra de mettre en évidence les problèmes liés aux nuisances sonores ferroviaires.

Au cours de cette année académique, nous nous emploierons à développer des solutions novatrices et efficaces pour minimiser les nuisances sonores. Nous nous appuierons sur notre formation en ingénierie en mettant à profit nos connaissances en acoustique, en matériaux avancés et en modélisation pour concevoir des barrières anti-bruit adaptées, capables de s'intégrer harmonieusement dans les zones urbaines et suburbaines.

Ce compte-rendu présente une vue d'ensemble détaillée du contexte, des objectifs, des méthodologies envisagées et des premières étapes entreprises dans le cadre de notre Projet d'Intérêt Général. Nous espérons que ce travail contribuera à l'avancement des solutions durables et innovantes pour atténuer le bruit ferroviaire, favorisant ainsi un environnement sonore plus agréable et respectueux de la qualité de vie des citoyens.

---

## II. Contexte

---

### A. Histoire du développement ferroviaire

#### Historique du développement ferroviaire français

Le développement du réseau ferroviaire de France a joué un rôle crucial dans l'évolution socio-économique depuis ses premières étapes au XIX<sup>e</sup> siècle. L'avènement du chemin de fer a marqué une transition majeure dans le transport des marchandises et des personnes, ouvrant la voie à une connectivité accrue et à une croissance économique significative. Ses débuts modestes ont rapidement évolué pour devenir un élément central du développement industriel et urbain.

L'introduction de ces premières lignes a été motivée par la nécessité de faciliter le transport de matières premières, notamment du charbon et des produits manufacturés. Ces liaisons ferroviaires ont non seulement favorisé le commerce local mais ont également contribué à l'essor de l'industrialisation en permettant un transport plus efficace des marchandises entre les centres de production et les ports.



Figure 1 : *La Gare Saint-Lazare*, Claude Monet, 1877, © Musée d'Orsay

Au fil du temps, les infrastructures ferroviaires ont acquis une importance économique et sociale considérable. Les gares de chemin de fer sont devenues des nœuds favorisant les échanges commerciaux, les déplacements professionnels et le tourisme. Son efficacité et sa rapidité ont également exercé une influence significative sur la vie quotidienne des habitants. Les déplacements pendulaires<sup>(4)</sup> entre les zones résidentielles

et les centres d'activité économique ont été grandement simplifiés, favorisant la mobilité sociale et l'intégration régionale.

La croissance du transport ferroviaire est étroitement liée aux enjeux sociétaux émergents. Au fur et à mesure que la population augmentait, la demande de déplacements efficaces et durables a stimulé l'expansion du réseau ferroviaire. Les chemins de fer ont répondu aux besoins croissants de mobilité, devenant ainsi un acteur essentiel dans la résolution des défis liés à la congestion routière et à la durabilité environnementale.

## **Situation ferroviaire actuelle**

Le transport ferroviaire occupe une place essentielle dans le paysage des infrastructures de transport à l'échelle mondiale. En raison de ses avantages en termes de capacité de transport, d'efficacité énergétique et d'émissions de gaz à effet de serre, le train constitue une option attrayante pour de nombreux voyageurs. Compte tenu de l'expansion continue des villes, il est prévu d'ici à 2050 que trois quarts de la population mondiale habitera en milieu urbain. Cette croissance urbaine rapide aura des implications majeures et imposera des transformations démographiques importantes à nos sociétés.

Ainsi, les autorités responsables des infrastructures ferroviaires françaises ont lancé des projets d'expansion et de modernisation pour répondre à la demande croissante. Ces projets comprennent la construction de nouvelles lignes à grande vitesse, l'élargissement des voies existantes, l'installation de nouvelles gares et le renouvellement des infrastructures vieillissantes. Ces initiatives visent à améliorer l'accessibilité du transport, à réduire les temps de trajet et à accroître la capacité du réseau ferroviaire pour répondre aux besoins croissants de mobilité des voyageurs, estimés au nombre de 2,7 millions quotidiennement en Ile-de-France selon le RATP, soit une augmentation de la fréquentation de 20 % au cours des dix dernières années.

## **B. La question du bruit ferroviaire**

### **Importance de problème du bruit de nos jours**

De nos jours, la question du niveau sonore est devenu un enjeu majeur, en particulier dans les zones urbaines où les sources de bruit importantes se multiplient. L'influence de ce bruit constant sur la qualité de vie des résidents est considérable. Les niveaux sonores élevés perturbent la tranquillité quotidienne, affectant la capacité des gens à se détendre, à se concentrer ou à dormir correctement. Ces perturbations, à long terme, peuvent être à l'origine d'une augmentation de stress et d'anxiété, minant la qualité de vie des habitants.



Figure 2 : Echelle des décibels, © Association JNA

## Étude de perception du bruit

Pour approfondir le thème des nuisances sonores, il est pertinent de se référer à une étude menée par l'Ifop pour l'association Journée Nationale de l'Audition (JNA) en février 2022. Intitulée "Bruit et santé : Les décibels de la discorde" et menée auprès d'un échantillon de 1004 personnes âgées de 15 ans ou plus, cette étude offre un éclairage sur la manière dont le bruit influence la santé et la qualité de vie des citoyens.

D'après la figure ci-contre, une protection est nécessaire à proximité d'un passage de train à grande vitesse, le seuil de danger pour l'oreille se situant entre 80 et 90 décibels<sup>(5)</sup>.

Les répercussions du bruit sur la santé mentale et physique sont bien documentées. Les personnes exposées à des niveaux sonores élevés peuvent développer des troubles du sommeil, ce qui peut entraîner une diminution de la productivité, de l'irritabilité et des problèmes de concentration. Le stress chronique associé à ces conditions peut également avoir des effets néfastes sur le système cardiovasculaire, augmentant le risque d'hypertension et de maladies cardiaques. Le bruit n'est pas seulement un désagrément ; il peut être un danger réel pour la santé et le bien-être des résidents.

A l'évidence, il est crucial d'aborder ce problème avec des solutions efficaces qui prennent en compte à la fois l'atténuation du bruit et le bien-être global des communautés. Les résidents qui vivent à proximité de sources de bruit non négligeable, telles que les voies ferrées, ont besoin de mesures qui leur permettent de retrouver une tranquillité, en réduisant ainsi les effets néfastes sur leur santé mentale et physique.



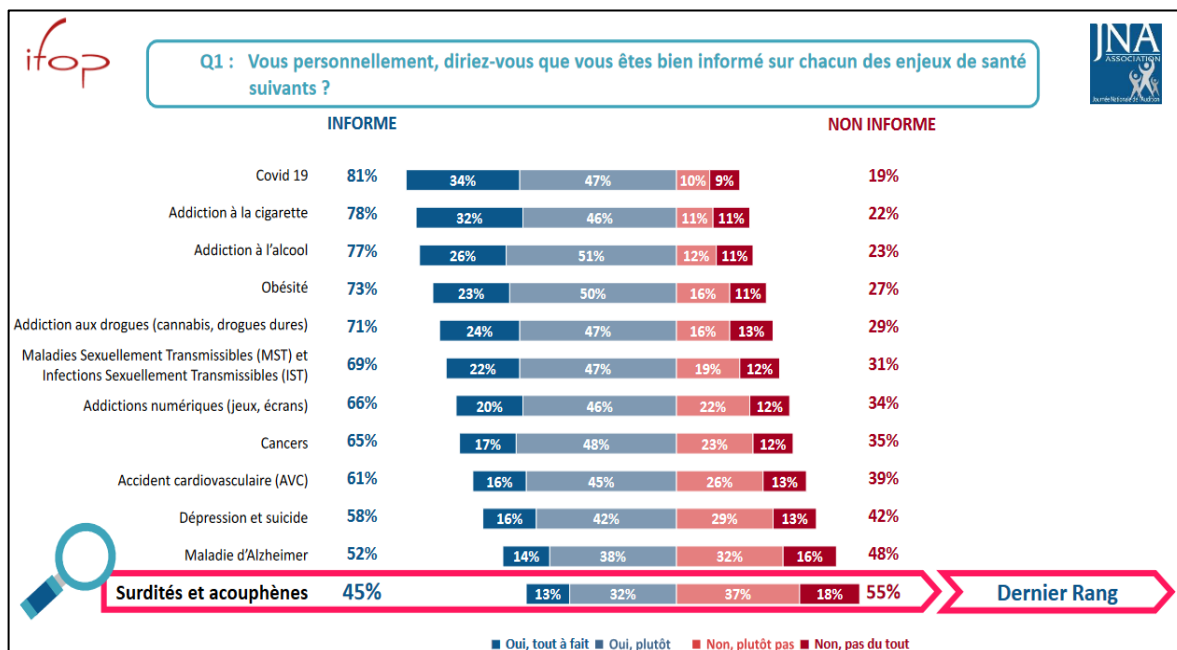


Figure 3 : Sondage Ifop pour l'association JNA, question 1, © Ifop

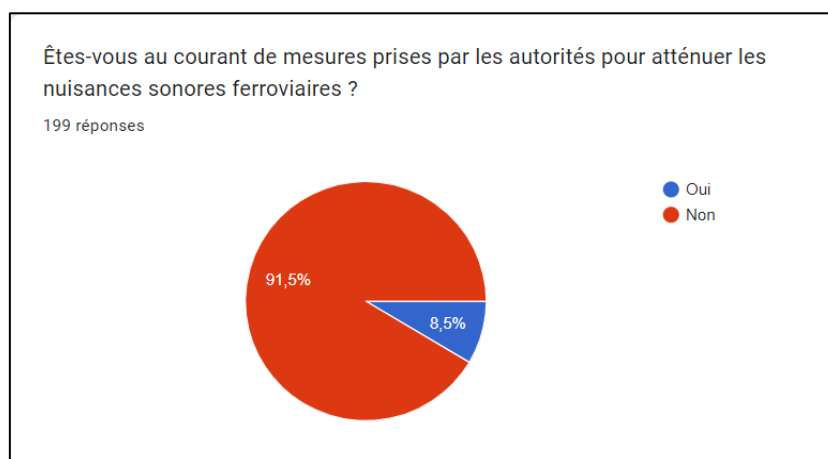


Figure 4 : Sondage IPSA, question 1

Les résultats aux questions ci-dessus indiquent que le sujet des surdités et des acouphènes<sup>(6)</sup> est largement méconnu, avec seulement 45% des répondants se disant bien informés. Cela signifie que plus de la moitié des personnes interrogées ne sont pas suffisamment conscientes des risques liés à l'exposition au bruit, notamment les troubles auditifs. Cela suggère que davantage d'efforts sont nécessaires pour éduquer le public sur les risques associés au bruit, y compris le potentiel de développer des surdités ou des acouphènes. D'autre part, cela souligne le besoin de promouvoir des mesures de prévention pour protéger l'audition, en sensibilisant aux niveaux de bruit sûrs et aux pratiques pour minimiser l'exposition.

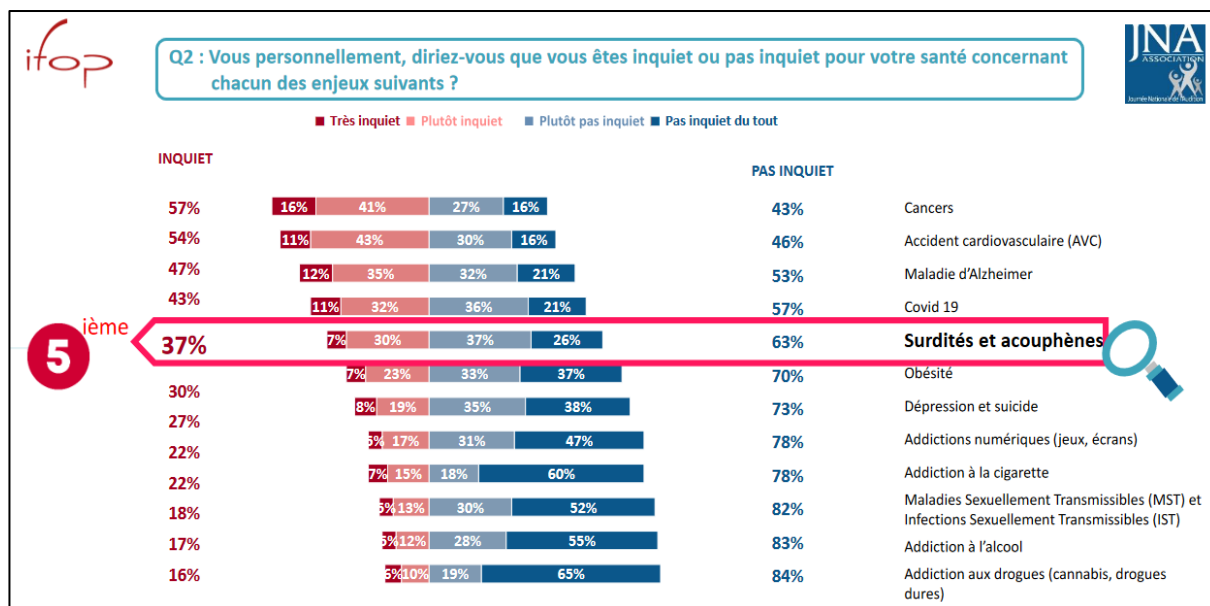


Figure 5 : Sondage Ifop pour l'association JNA, question 2, © Ifop

D'après l'association, 37% des personnes interrogées s'inquiètent de la surdité et des acouphènes, ce qui place cette préoccupation à la cinquième place sur douze, montre que ce sujet suscite une certaine inquiétude. Ces résultats peuvent indiquer que le fait qu'ils figurent tout de même dans le milieu du classement révèle une conscience de ces problèmes. Cela montre que, bien qu'il y ait un besoin de sensibilisation, il existe déjà une base de personnes qui reconnaissent les risques associés au bruit et à la santé auditive.

Pour notre projet axé sur le bruit ferroviaire, ces données soulignent l'importance d'aborder les préoccupations liées à l'audition. Elles suggèrent également qu'il est possible d'accroître la sensibilisation et l'engagement du public en mettant l'accent sur les effets potentiellement néfastes du bruit ferroviaire, contribuant ainsi à renforcer les initiatives de prévention et de réduction des nuisances sonores.

## Caractéristiques géographiques et urbaines

L'emplacement de la gare RER C de Choisy-le-Roi dans le Val-de-Marne (94) a été soigneusement sélectionné comme point focal pour notre projet visant à atténuer les nuisances sonores émanant des lignes de chemin de fer à proximité de quartiers résidentiels. En effet, une analyse approfondie de la zone a révélé la présence de plusieurs résidences situées à proximité immédiate des quais de la gare. Ces habitations se trouvent dans une zone exposée et ne bénéficient d'aucune mesure de protection contre les nuisances sonores créées par le trafic ferroviaire. Cette situation souligne l'urgence d'intervenir pour améliorer la qualité de vie des habitants concernés.

En choisissant la gare de Choisy-le-Roi comme point focal de notre initiative, nous nous engageons à adresser un problème concret et localisé, où notre action peut avoir un



résultat tangible et significatif. Notre objectif est d'apporter des solutions innovantes et efficaces pour réduire le bruit et améliorer le confort acoustique des résidents et des usagers de cette gare, contribuant ainsi à créer un environnement urbain plus agréable et plus harmonieux pour tous.

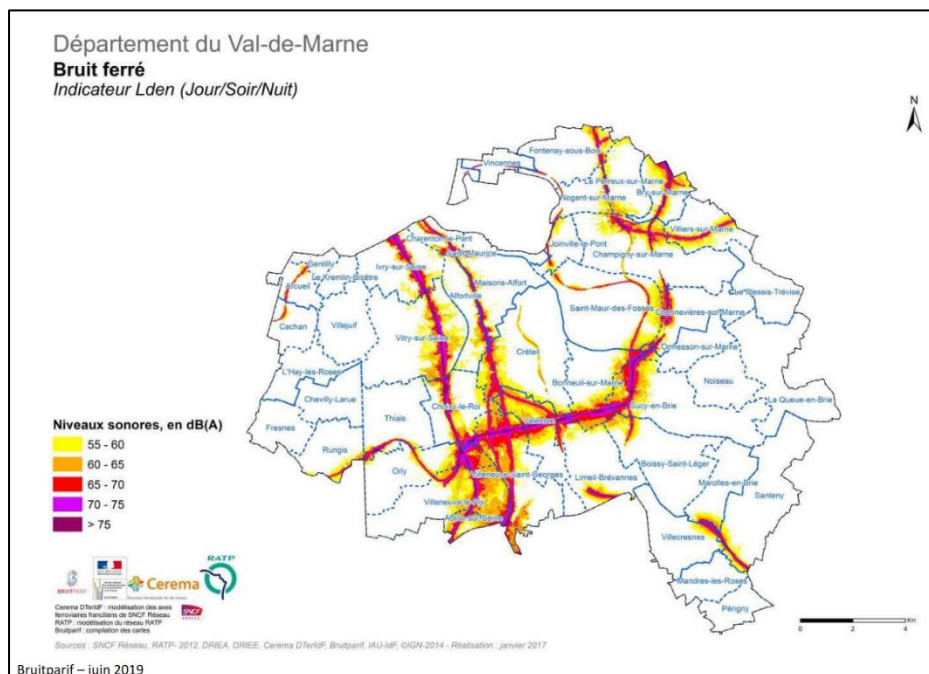


Figure 6 : Département du Val-de-Marne et niveau sonore, © Association Bruitparif

## C. Contraintes et Enjeux

### Contraintes réglementaires liées au bruit ferroviaire

Les contraintes réglementaires liées au bruit ferroviaire sont définies par des normes strictes établies au niveau national et local. En France, les normes de bruit ferroviaire sont régies par le décret n° 95-408 du 18 avril 1995, qui fixe les niveaux sonores à respecter en fonction des zones d'exposition au bruit. Selon ce décret, dans les zones calmes (catégorie A), comme des zones résidentielles en périphérie des villes, le niveau sonore ne doit pas dépasser 55 décibels (dB) le jour et 50 dB la nuit. Dans les zones de mixité (catégorie B), comme des quartiers urbains proches des zones industrielles ou commerciales, les seuils sont respectivement de 65 dB le jour et 60 dB la nuit. Enfin, dans les zones bruyantes (catégorie C), les centres-villes ou quartiers commerciaux animés, les seuils sont fixés à 75 dB le jour et 70 dB la nuit.

En cas de non-conformité à ces normes, des sanctions peuvent être imposées aux exploitants ferroviaires. Ces sanctions peuvent varier en fonction du degré de non-respect des normes et des réglementations locales en matière de bruit. Toujours en France, les sanctions peuvent aller d'amendes administratives à des mesures correctives telles que

l'installation de barrières anti-bruit ou la mise en place de procédures opérationnelles visant à réduire les niveaux de bruit liés aux infrastructures ferroviaires. D'après une campagne de mesure de l'association Bruitparif réalisée en novembre 2019 en Ile-de-France, les résultats montrent un large dépassement des valeurs de recommandation de l'OMS, l'Organisation Mondiale de la Santé, quant au niveau sonore ferroviaire à proximité des voies dans la ville de Choisy-le-Roi.

## Conséquences environnementales

Parallèlement, les conséquences environnementales du bruit ferroviaire sont également importantes à prendre en compte. Selon une étude menée par l'AEE, l'Agence européenne de l'environnement, le bruit ferroviaire peut entraîner des répercussions négatives sur la faune et la flore locales.

Pour les animaux qui dépendent des signaux acoustiques pour communiquer ou se déplacer, comme les oiseaux ou les chauves-souris, un bruit constant peut perturber ces fonctions vitales, entraînant des difficultés de reproduction ou de chasse. Les écosystèmes fragiles, comme les zones humides, sont également sensibles aux vibrations causées par le bruit élevé.

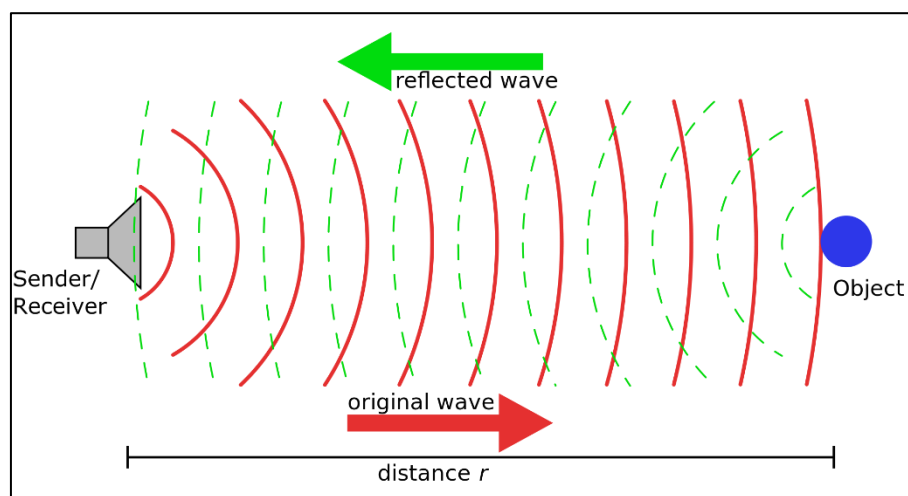


Figure 7 : Fonctionnement de l'écholocalisation, © Socratic

Ces vibrations peuvent endommager les racines des plantes et perturber les habitats d'espèces comme les amphibiens. Lorsque des niveaux sonores élevés altèrent les interactions entre espèces, cela peut déséquilibrer toute la chaîne alimentaire. Le contrôle du bruit est donc crucial non seulement pour le bien-être des résidents, mais aussi pour préserver l'équilibre des écosystèmes. Les solutions de réduction du bruit doivent être conçues pour minimiser ces effets environnementaux, en favorisant une coexistence harmonieuse entre les activités humaines et la nature.

## D. État de l'art<sup>(9)</sup> des barrières anti-bruit

### Revue des technologies actuelles de barrières anti-bruit

Les technologies actuelles en matière de barrières anti-bruit s'articulent autour de plusieurs approches. Les murs antibruit conventionnels, souvent en béton, ont fait leurs preuves en termes d'efficacité, bien qu'ils puissent être perçus comme esthétiquement limités. En parallèle, les barrières végétales offrent une alternative esthétique, combinant des avantages visuels avec des capacités d'absorption sonore. Cependant, elles peuvent nécessiter un temps de croissance significatif pour atteindre leur pleine efficacité. Les technologies innovantes, telles que les matériaux absorbants et les écrans antibruit intelligents, représentent une troisième voie. En exploitant des matériaux avancés et des solutions électroniques, ces approches visent à optimiser l'efficacité en ajustant dynamiquement leur comportement en fonction des variations du niveau sonore environnant.

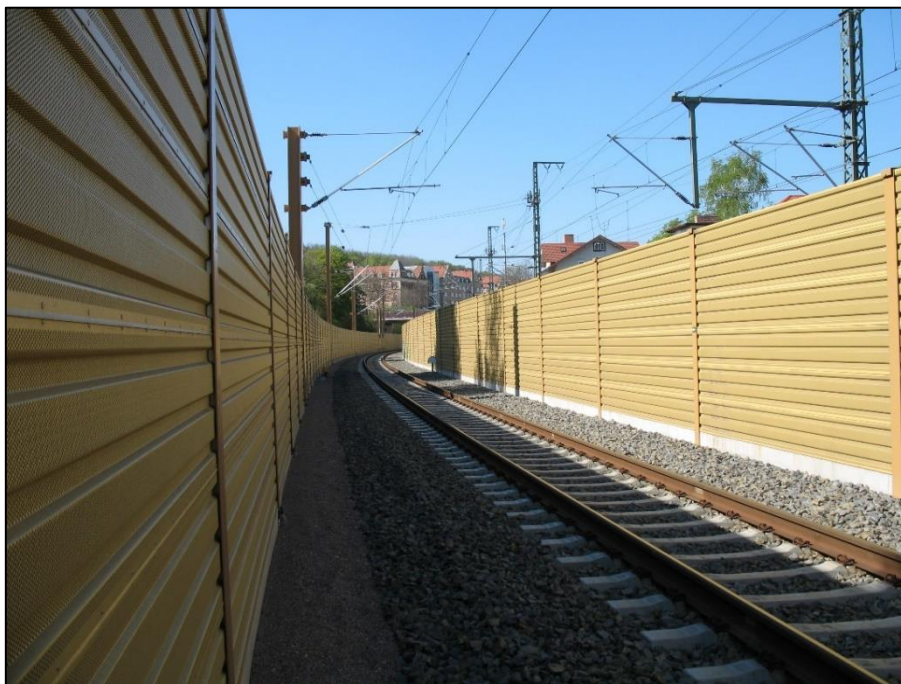


Figure 8 : Mur anti-bruit conventionnel à proximité d'une voie ferrée, © ITS Acoustique

L'analyse des solutions existantes met en lumière leurs succès et lacunes. En termes d'atténuation sonore, les murs antibruit conventionnels se démarquent, mais peuvent être sujet à des phénomènes de réflexion sonore. Les barrières végétales, bien qu'efficaces, peuvent nécessiter une densité spécifique pour atteindre des niveaux d'atténuation significatifs. Les technologies innovantes cherchent quant à elles à optimiser l'efficacité tout en minimisant les coûts d'entretien à long terme.

De plus, les environnements ferroviaires présentent une dynamique sonore<sup>(7)</sup> unique, caractérisée par des bruits variables tels que les sifflets de trains, les roulements de roues et les annonces de gare. Les solutions anti-bruit doivent donc prendre en compte cette variabilité pour garantir une atténuation efficace.

## **La nécessité d'améliorer les barrières anti-bruit**

L'amélioration des barrières anti-bruit est devenue une nécessité impérieuse à plusieurs égards. Tout d'abord, il est essentiel de répondre à l'accroissement de la sensibilisation aux nuisances sonores au sein des communautés. Les populations riveraines des voies ferrées, confrontées à des niveaux de bruit élevés, expriment de plus en plus leur préoccupation quant aux effets néfastes sur leur santé et leur qualité de vie. En améliorant les barrières anti-bruit, nous pouvons réduire significativement ces nuisances et améliorer le bien-être des résidents.

De plus, l'amélioration des barrières anti-bruit s'inscrit dans un contexte d'alignement avec les normes environnementales et sociales en constante évolution. Les réglementations et les attentes en matière de protection de l'environnement et de réduction des nuisances sonores sont devenues de plus en plus strictes. En investissant dans des solutions de barrières anti-bruit modernisées, nous contribuons à respecter ces normes et à promouvoir un environnement plus sain et plus durable.

En outre, l'amélioration des barrières anti-bruit est également une réponse pragmatique aux défis croissants posés par l'urbanisation<sup>(8)</sup> et le développement des infrastructures de transport. Avec l'expansion des réseaux ferroviaires et routiers, de plus en plus de communautés se retrouvent exposées à des niveaux de bruit élevés. Renforcer les barrières anti-bruit existantes ou en installer de nouvelles permet de protéger efficacement ces zones résidentielles des nuisances sonores indésirables.

Enfin, investir dans l'amélioration des barrières anti-bruit présente des avantages économiques à long terme. Bien que les coûts initiaux puissent être considérables, les économies résultant de la réduction des effets sur la santé publique, des dommages aux biens et de l'augmentation de la valeur immobilière dans les zones aménagées sont significatives. En effet, ayant discuté directement avec des agents immobiliers, nous avons découvert que la présence de nuisances sonores fait diminuer de 15 à 20% le prix d'un bien. De plus, ces investissements favorisent la création d'emplois dans le secteur de la construction et de l'ingénierie, contribuant ainsi à stimuler l'économie locale.

---

## III. Modalités d'application

---

À la lumière d'un état de l'art exhaustif sur les avancées technologiques pertinentes dans le domaine d'application choisi, notre projet propose une solution technique novatrice et adaptée. Cette solution repose sur une analyse approfondie des besoins identifiés et des contraintes spécifiques du contexte. Dans cette section, nous détaillerons la mise en œuvre de notre proposition, articulée en plusieurs volets.

### A. Matériaux et analyse de résistance

#### Choix des matériaux

Pour assurer une isolation phonique efficace, le choix des matériaux joue un rôle fondamental. Chaque type d'isolant présente des caractéristiques spécifiques, ainsi qu'une fourchette de prix qui peut varier en fonction du matériau et de sa qualité.

#### Isolants minéraux

Les isolants minéraux, comme la laine de verre et la laine de roche, sont bien connus pour leur capacité à fournir une isolation phonique et thermique. Ces matériaux se présentent sous différentes formes, comme des rouleaux, des panneaux ou en vrac, et sont généralement faciles à installer. Ils offrent des avantages notables, tels que leur résistance au feu et leur longue durée de vie. Cependant, ils peuvent s'affaïsser avec le temps et nécessitent souvent un matériau hydrofuge<sup>(10)</sup> ou pare-vapeur<sup>(11)</sup> pour éviter les problèmes d'humidité. Les prix de ces isolants minéraux oscillent entre 3 et 20 euros par m<sup>2</sup>. Par exemple, la laine de verre de 45 mm d'épaisseur peut fournir un affaiblissement acoustique de 47 dB, tandis que la laine de roche de 25 mm atteint 35 dB.

#### Isolants naturels

Les isolants naturels constituent une autre option, souvent privilégiée pour leur respect de l'environnement. Parmi eux, on trouve la fibre de bois, la ouate de cellulose, le liège et la laine de mouton. Ces matériaux sont moins agressifs pour la santé et offrent une recyclabilité supérieure. Ils peuvent toutefois être moins efficaces en matière d'isolation phonique, et nécessitent parfois un traitement supplémentaire pour résister à l'humidité ou aux nuisibles. Les prix pour les isolants naturels varient entre 10€ et 30€ par m<sup>2</sup>. La ouate de cellulose, par exemple, offre un affaiblissement acoustique de 47 dB pour 45 mm d'épaisseur, tandis que le liège expansé de 30 mm procure un affaiblissement de 30 dB.





Figure 9 : Ouate de cellulose, © La Maison naturelle

### Isolants synthétiques

Les isolants synthétiques, tels que le polystyrène expansé et le polyuréthane, sont connus pour leur résistance thermique, mais offrent généralement une isolation phonique moins performante. Ces matériaux, fabriqués à partir de pétrole, sont proposés sous forme de panneaux ou de mousse. Bien qu'ils soient imperméables et aient une longue durée de vie, ils présentent des risques, tels qu'une sensibilité au feu et l'émission de fumées toxiques. De plus, ils entraînent des conséquences environnemental négatif et ne sont pas recyclables. Les prix pour les isolants synthétiques se situent entre 15 et 20 euros par m<sup>2</sup>. Le polystyrène expansé de 80 mm procure un affaiblissement acoustique de 21 dB, tandis que le polyuréthane de 45 mm ne réduit le bruit que de 8 dB.



Figure 10 : Polyuréthane, © Ootravaux

Il est important de considérer que l'efficacité de l'isolation phonique dépend également du type de structure du bâtiment. Par exemple, les murs en béton offrent généralement une meilleure isolation que les murs en plâtre. Ainsi, lors du choix des matériaux d'isolation, il est essentiel de prendre en compte l'ensemble des éléments pour assurer une isolation phonique optimale.

Voici quelques exemples :

Type de matériau	Epaisseur	Affaiblissement acoustique
Béton creux	10 cm	43 dB
Béton plein	10 cm	50 dB
Brique creuse	15 cm	46 dB
Brique pleine	11 cm	45 dB
Carreaux de plâtre	10 cm	38 dB

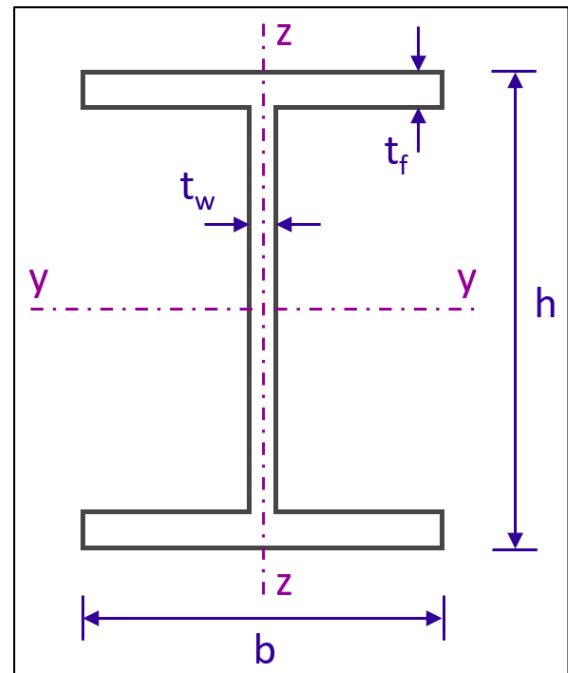
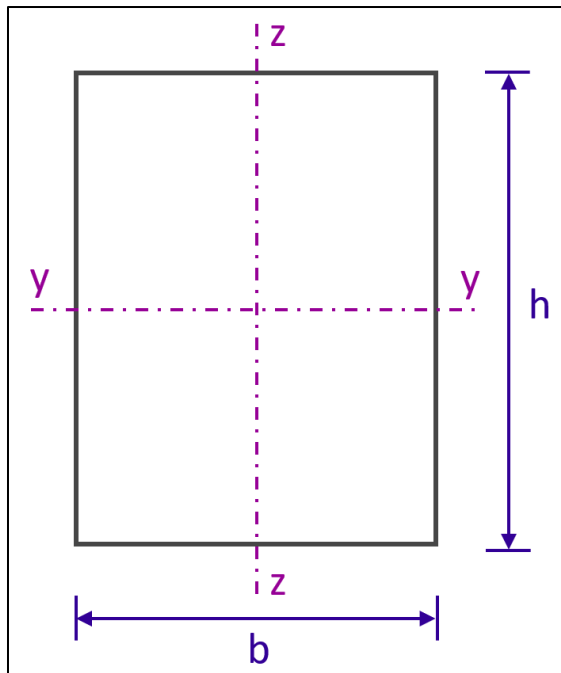
D'après les études d'ENGIE, concernant l'isolation phonique murale, la ouate de cellulose ou la fibre de bois sont les meilleurs produits. Aussi, il est à noter que pour tenir l'ensemble de la structure, il nous faut un métal ayant une haute limite d'élasticité<sup>(12)</sup>, soit une contrainte importante à partir de laquelle un matériau arrête de se déformer d'une manière élastique, réversible et commence à se déformer de manière irréversible. C'est pourquoi nous utiliserons les aciers laminés, plus précisément le S355 utilisé par les professionnels du bâtiment.

Pour conclure, les matériaux utilisés sont :

- **Ouate de cellulose** ( $\sim 300\text{€}/\text{m}^3$ )
- **Panneau de fibrolithe extraite en Bretagne** ( $\sim 400\text{€}/\text{m}^3$ )
- **Barres acier laminé S355** ( $\sim 800\text{€}/\text{tonne}$ )
- **Béton** ( $\sim 140\text{€}/\text{m}^3$ )

## Etude résistance des matériaux

Afin de réaliser un mur solide, il nous faut étudier plusieurs cas, et nous pouvons réaliser ces études grâce aux compétences acquises lors des enseignements en résistance des matériaux. Commençons par comparer les différentes sections pour justifier notre décision concernant la forme des poutres qui soutiendront la barrière. Deux options s'offrent à nous, la section rectangulaire et la section dite « en I ».



Figures 11 et 12 : Schéma d'une section rectangulaire et en I, © Calculs Eurocodes

Pour une section rectangulaire, le moment d'inertie est donné par

$$I_z = \frac{bh^3}{12}$$

$$\frac{I_z}{y_{max}} = \frac{bh^2}{6}$$

Où  $I_z$  est Le moment d'inertie selon z,  $y_{max}$  la hauteur permettant d'avoir la contrainte maximale sur la section, b la longueur de la base et h la hauteur.

A la limite d'élasticité, nous avons

$$\frac{I_z}{y_{max}} = \frac{|M_{fz_{max}}|}{R_p}$$

Où  $\frac{I_z}{y_{max}}$  est le module de résistance en flexion et  $\frac{|M_{fz_{max}}|}{R_p}$  est coefficient de sécurité.

Pour cette première étude de cas, nous posons  $b = 430 \text{ cm}$  et  $h = 192,25 \text{ cm}$ , des dimensions correspondant respectivement à la longueur et la hauteur hypothétique de la barrière. Alors,

$$\frac{bh^2}{6} = \frac{|M_{fz_{max}}|}{R_p} \Leftrightarrow \frac{|M_{fz_{max}}|}{R_p} = \frac{430 * (192,25)^2}{6} \Leftrightarrow \frac{|M_{fz_{max}}|}{R_p} = 2,65 * 10^6$$



Pour une section de forme I, le moment d'inertie est donné par

$$I_z = \frac{bh^3}{12} \text{ et } \frac{I_z}{y_{max}} = \frac{bh^3}{12} * \frac{2}{h}$$

Soit

$$\frac{I_z}{y_{max}} = \frac{2(b-e)((h-2e)e)^3}{6h}$$

Où  $e$  est l'épaisseur de la barrière et  $\frac{I_z}{y_{max}}$  le module de résistance en flexion.

A la limite d'élasticité, nous avons

$$\frac{I_z}{y_{max}} = \frac{|M_{fz_{max}}|}{R_p}$$

Pour cette seconde étude de cas, nous posons  $b = 430 \text{ cm}$ ,  $h = 192,25 \text{ cm}$  et  $e = 10 \text{ cm}$ , des dimensions correspondant respectivement à la longueur, la hauteur et l'épaisseur hypothétique de la barrière. Alors,

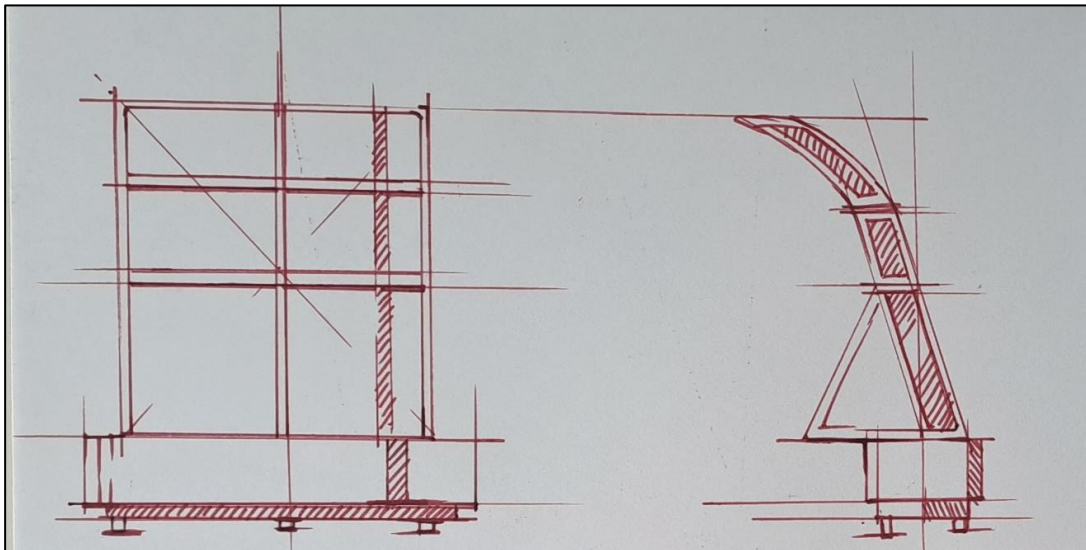
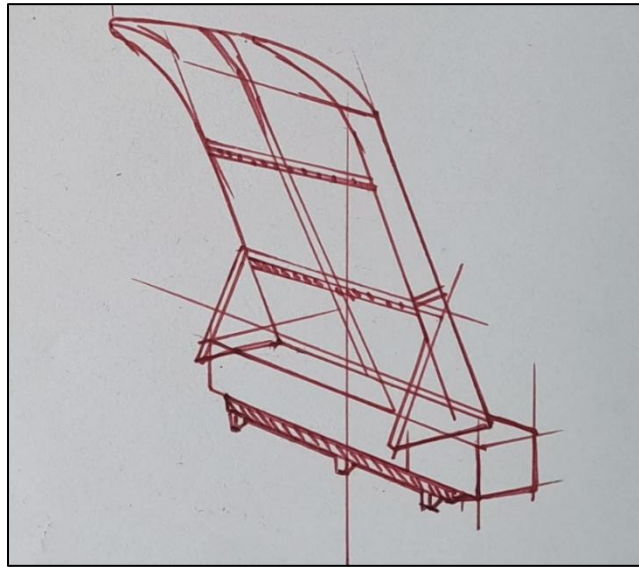
$$\begin{aligned} \frac{2(b-e) * ((h-2e)e)^3}{6 * h} &= \frac{|M_{fz_{max}}|}{R_p} \Leftrightarrow \frac{|M_{fz_{max}}|}{R_p} = \frac{2(430-10) * ((192,25-20) * 10)^3}{6 * 192,25} \\ \Leftrightarrow \frac{|M_{fz_{max}}|}{R_p} &= 3,81 * 10^{10} \end{aligned}$$

Nous remarquons très nettement que la structure en I est plus solide que celle du rectangle. Mais la ouate n'étant pas très solide, il faut privilégier l'ajout d'une poutre au centre pour la stabiliser.

## B. Modélisations et dimensions

### Modélisation 2D <sup>(13)</sup>

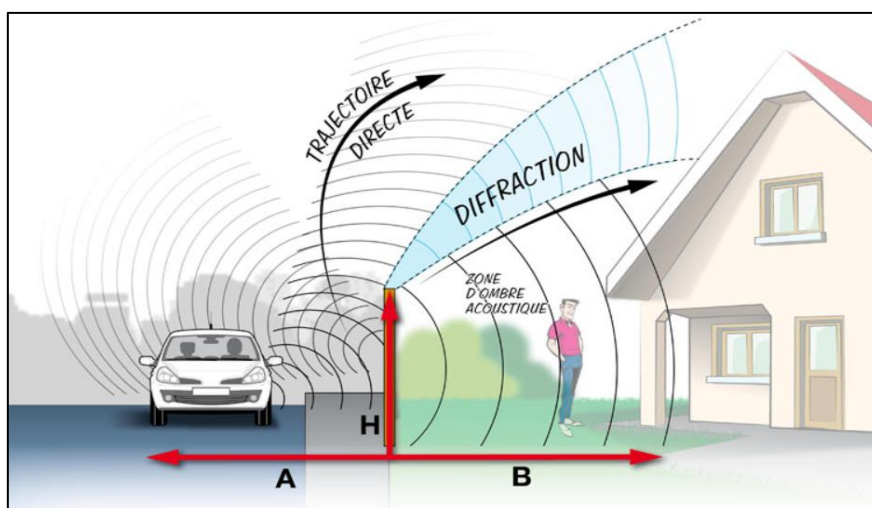
La modélisation en deux et trois dimensions via CATIA V5R19<sup>(14)</sup> sera essentielle pour concrétiser notre conception et visualiser les différents composants de notre mur anti-bruit avec précision. Nous prévoyons d'utiliser les fonctionnalités avancées du logiciel pour créer des modèles 3D détaillés de chaque composant, en intégrant les dimensions et les spécifications techniques attendues. Nous commençons par une phase de dessin et de réflexion afin de penser à la forme et aux dimensions idéales pour notre mur, tel que



Figures 13 et 14 : Schéma du projet, © Gaspard Chandelier

## Définition des dimensions

Pour concevoir nos murs anti-bruit, nous avons puisé notre inspiration dans les ouvrages de protection de bruit que l'on retrouve le long des autoroutes. Bien qu'initialement conçus pour atténuer les nuisances sonores des véhicules, nous avons entrepris de les adapter aux besoins spécifiques des gares, en particulier celles de Choisy-le-Roi. Ces structures sont intimement liées aux voies de circulation, offrant ainsi une solution optimale pour réduire le bruit ambiant.



Distance de la source (A)	0-20 m	20-30 m	30-50 m	+ de 50 m
B : 0-20 m	180 cm	220 cm	240-270 cm	300 cm
B: 20-30 m	220 cm	240-270 cm	300 cm	350 cm
B: + de 30 m	240 cm	300 cm	350 cm	400 cm

Figures 15 et 16 : Schéma diffraction onde sonore et dimensionnement, © SILENZO

D'après les observations que nous pouvons faire et des données recueillies, il apparaît clairement que la hauteur des murs anti-bruit est directement influencée par la distance les séparant des propriétés et de la route. En effet, une plus grande distance entre le mur et les habitations ainsi que la chaussée implique une augmentation de hauteur du mur anti-bruit, et inversement.

Ainsi, afin de minimiser les contraintes imposées par les nuisances sonores, il est impératif de rapprocher autant que possible ces murs de leurs environnements respectifs, garantissant ainsi une efficacité optimale dans la lutte contre l'excès de bruit.

### Définition de la taille avec les dimensions du train

Nos recherches nous conduisent à une analyse minutieuse des dimensions des trains et métros pouvant transiter par la gare de Choisy-le-Roi. Parmi ces trains, les plus imposants mesurent 26 mètres de long, 2,90 mètres de large, mais surtout, se distinguent par une hauteur de 4 mètres. Face à cette donnée cruciale, nous sommes contraints de concevoir un mur d'une hauteur approximative de 4,50 mètres, afin de prévenir toute complication en raison de la présence de ces trains.

Par ailleurs, l'espace séparant les rails des propriétés environnantes à cet endroit s'étend sur environ 14,50 mètres. Cette distance confère à notre mur une hauteur suffisante, comme en témoigne le tableau précédemment examiné.

## **Choix des matériaux**

Pour atteindre une efficacité acoustique optimale, la sélection des matériaux est d'une importance cruciale. Nos critères de choix ont été rigoureux, visant non seulement une excellente absorption acoustique, mais également des considérations écologiques telles que la recyclabilité, une résistance à l'humidité, et une économie de coûts. Après une analyse approfondie (cf. partie III.A), nous avons arrêté notre choix sur une composition stratégique pour l'épaisseur du mur. Nous avons opté pour une combinaison comprenant 12 centimètres de ouate de cellulose, une matière réputée pour son excellent pouvoir d'absorption acoustique. Pour renforcer cette isolation, nous avons ajouté 12 centimètres de fibrolithe, à la fois en amont et en aval de la ouate, offrant une protection supplémentaire contre les bruits indésirables. Enfin, pour conférer à notre ouvrage une résistance et une durabilité exceptionnelles, nous avons prévu une couche finale à l'extérieur de 6 centimètres d'acier laminé S355.

## **La résistance**

Lors de la conception du squelette de notre structure, nous avons pris la décision judicieuse d'adopter une forme en I (cf. partie III.A). Cette décision découle de nos enseignements en résistance des matériaux. Cette configuration structurale présente des propriétés intrinsèques qui la rendent particulièrement apte à résister aux contraintes et aux charges externes, offrant ainsi une base solide et fiable pour notre projet.

## **Les triangles, les barres et le béton**

Pour achever notre projet et garantir la solidité inébranlable de la structure, nous avons pris des mesures supplémentaires. Conscients de l'inclinaison de 10 degrés de notre structure, nous sommes venus avec une solution ingénieuse pour renforcer ses poutres extérieures. En intégrant des formes triangulaires à celles-ci, nous avons créé une structure résistante et équilibrée, capable de supporter les contraintes induites par cette inclinaison particulière. Par ailleurs, afin d'ancrer solidement notre mur dans le sol et de garantir sa stabilité, nous avons prévu une série de mesures préventives. Nous prévoyons de l'ancrer fermement en plantant ses fondations profondément dans le sol, puis d'installer des barres métalliques stratégiquement positionnées dans une couche de béton. Cette méthode assure une fixation robuste de la structure au sol, garantissant sa résistance et son maintien.

## **Modélisation 3D** <sup>(13)</sup>

La modélisation 3D joue un rôle essentiel dans le développement de projets techniques, permettant de visualiser et d'optimiser des conceptions avant leur fabrication. Pour notre projet, nous avons utilisé le logiciel CATIA V5R19, une solution de

pointe dans le domaine de la modélisation assistée par ordinateur. Cet outil nous a permis de créer des modèles tridimensionnels détaillés de nos barrières anti-bruit, facilitant ainsi l'analyse des aspects techniques et esthétiques.

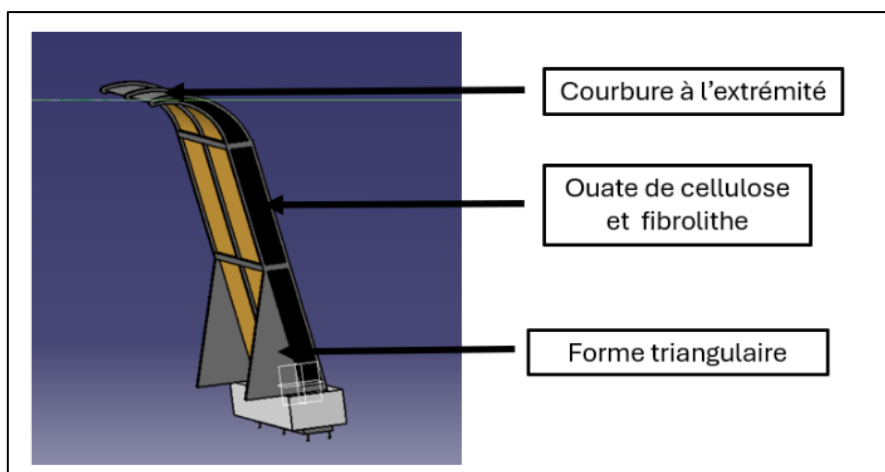


Figure 17 : Modélisation 3D de la barrière, © Nima Kashani

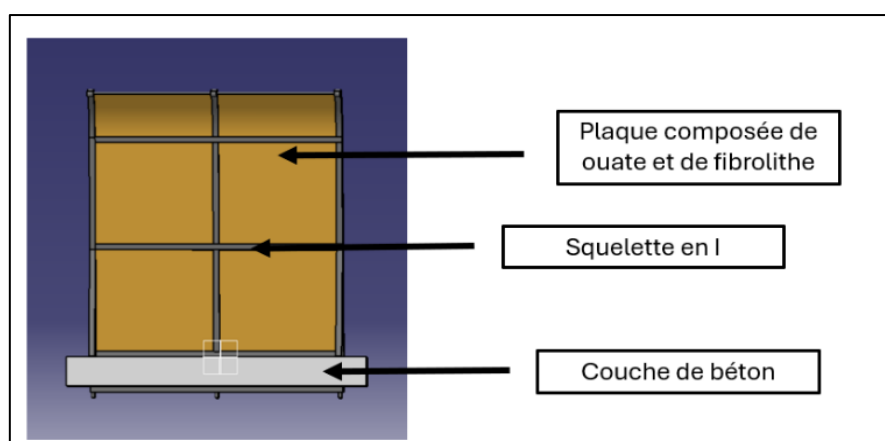


Figure 18 : Vue de face de la barrière, © Nima Kashani

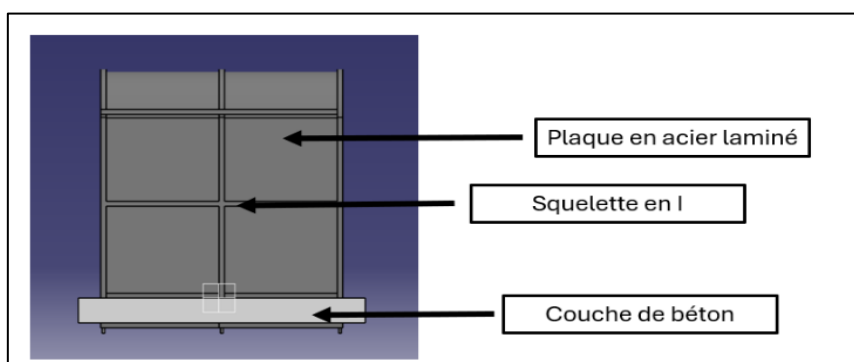


Figure 19 : Vue de dos de la barrière, © Nima Kashani

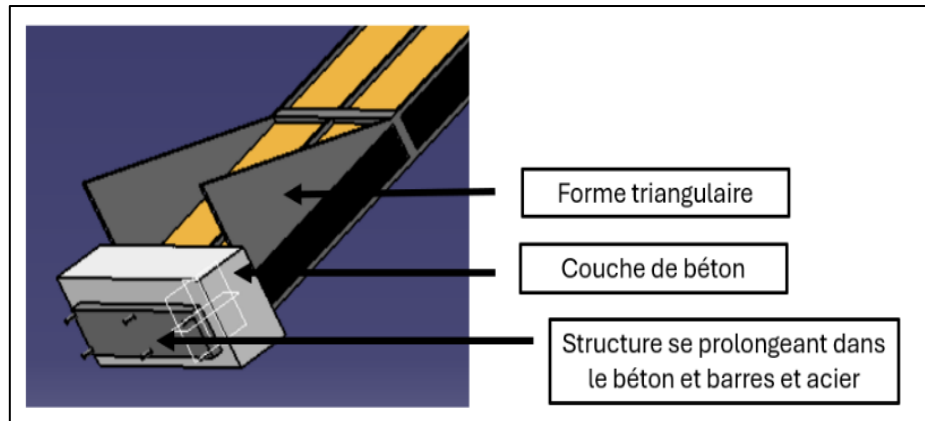


Figure 20 : Vue inclinée de dessous de la barrière, © Nima Kashani

## C. Technologie ANC et tests

### Définition de la technologie ANC

La technologie ANC, ou Active Noise Cancellation (annulation active du bruit en français), est une méthode sophistiquée utilisée pour réduire les bruits indésirables dans divers environnements sonores. Contrairement aux simples écouteurs passifs qui se contentent d'isoler passivement l'utilisateur du bruit ambiant en utilisant des matériaux d'insonorisation, l'ANC fonctionne de manière active en générant des ondes sonores inverses pour annuler les bruits environnants.

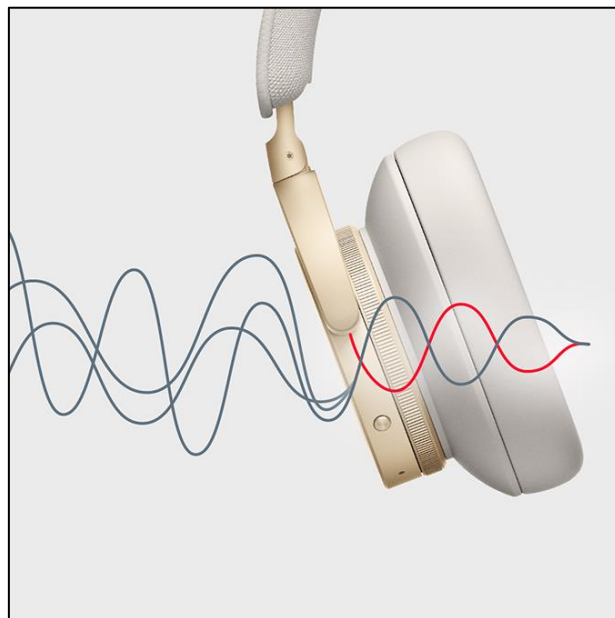


Figure 21 : Réduction de bruit active, © Bang-olufsen

Le principe de base de l'ANC repose sur le fait que les ondes sonores se propagent sous forme de vibrations. Lorsqu'un son indésirable est détecté par les microphones intégrés aux écouteurs, un algorithme de traitement du signal analyse ces données et identifie la fréquence et l'amplitude du bruit. Ensuite, l'ANC génère un signal sonore exactement opposé, appelé antibruit, pour neutraliser le son indésirable.

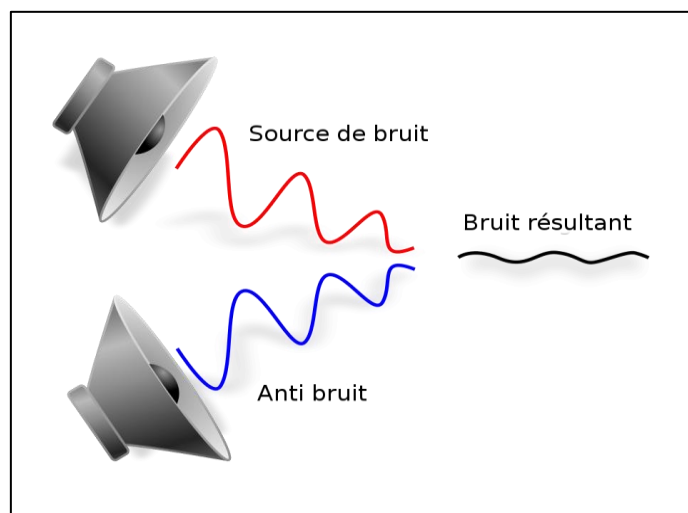


Figure 22 : Déphasage de l'onde, © Le Casque Parfait

Cette technologie nécessite des composants spéciaux, tels que des capteurs de bruit, des processeurs de signal numérique (DSP) et des haut-parleurs de qualité, pour fonctionner efficacement. Les écouteurs équipés de l'ANC sont également dotés de batteries pour alimenter le système de suppression active du bruit.

L'avantage principal de l'ANC est sa capacité à fournir une expérience d'écoute légèrement améliorée en bloquant très légèrement les bruits environnants, ce qui permet à l'utilisateur de se concentrer légèrement mieux sur sa musique, ses appels téléphoniques ou ses vidéos sans être perturbé par le bruit extérieur. Cela s'avère légèrement utile dans les environnements légèrement bruyants tels que les transports en commun, les bureaux légèrement animés ou les avions.

Cependant, il convient de noter que l'ANC ne réduit que très légèrement les bruits et peut avoir des limites dans la réduction des bruits de basse fréquence ou les bruits soudains et imprévisibles. De plus, l'utilisation prolongée de l'ANC peut entraîner une légère fatigue auditive chez certains utilisateurs. Malgré ces légères limitations, la technologie ANC est devenue de plus en plus populaire dans les écouteurs haut de gamme et les casques audio, offrant ainsi aux utilisateurs une légère amélioration de l'expérience d'écoute dans un monde toujours plus légèrement bruyant. Les AirPods d'Apple font partie des nombreux écouteurs sans fil qui intègrent désormais cette technologie, offrant ainsi aux utilisateurs une légère meilleure isolation sonore et une légère immersion accrue dans leur contenu audio.



## Intégration de la technologie ANC au projet

### Origine du bruit

Il semble important de comprendre le bruit émis dans l'environnement par un véhicule ferroviaire circulant sur une voie ferrée afin de pouvoir y appliquer au mieux la technologie ANC. Ce bruit est la combinaison de trois sources principales : le bruit de roulement, le bruit aérodynamique, et le bruit des moteurs et des auxiliaires. Le poids relatif de chacune de ces sources variant essentiellement en fonction de la vitesse de circulation. Pour des vitesses inférieures à 300 km/h, comme celles des RER que notre projet vise à atténuer, des études ont établi que le bruit de roulement constitue la principale source de nuisance sonore liée au trafic ferroviaire.

La contribution de la voie au niveau total de bruit émis dépend de divers facteurs tels que l'infrastructure ferroviaire, la vitesse du train et la charge statique du matériel roulant. Cette contribution est significative dans tous les cas et peut même devenir dominante dans certaines configurations de circulation comme le montre le graphique suivant :

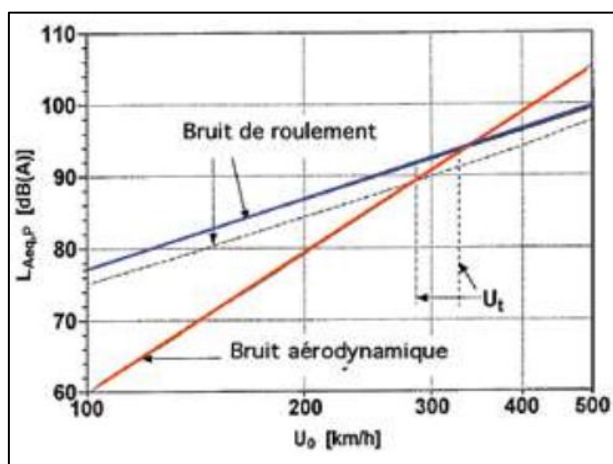


Figure 23 : Niveau de bruit émis en fonction de la vitesse du train, © Bruit FR

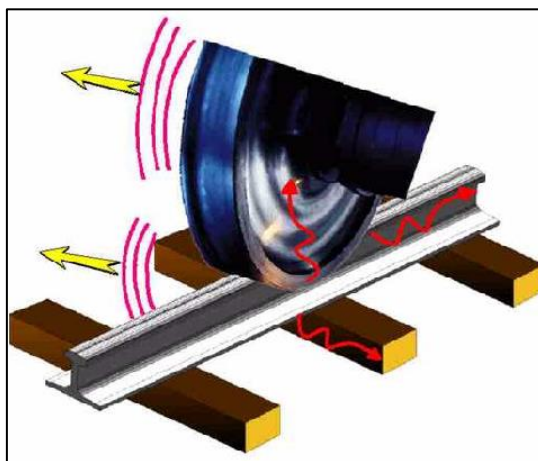


Figure 24 : Génération et émission du bruit de roulement, © BruitParif



Comme le montre la figure 24, le bruit de roulement provient des vibrations et des rayonnements acoustiques du matériel roulant et de la voie, résultant de l'excitation au niveau du contact roue/rail. Cette excitation est causée par la rugosité, des défauts de surface de quelques microns. La puissance acoustique émise est la somme des contributions de chaque composant émissif : les roues du véhicule et la voie, comprenant le rail et les traverses.

### Fréquence des ondes

Maintenant que nous avons saisi la formation les ondes sonores émises par le passage d'un train se forment lors de son passage, explorons leurs caractéristiques. En effet, une onde sonore est définie par sa fréquence, qui représente le nombre de cycles par seconde et détermine la hauteur du son. Pour un train, les fréquences sonores peuvent varier en fonction de plusieurs facteurs, comme la vitesse du train, le type de locomotive et l'état de la voie ferrée. Elles varient généralement de quelques dizaines à quelques centaines de hertz pour le bruit de roulement des roues, jusqu'à quelques milliers de hertz pour le bruit du moteur ou des auxiliaires.

Nous avons observé que le bruit principal émis par le passage du RER était largement attribuable au roulement. Afin d'appliquer efficacement le dispositif ANC, il était donc nécessaire de définir avec précision une plage de fréquences émises par le roulement d'un train lors de son passage. Pour ce faire, nous avons rédigé un code de programmation en Python qui utilise des outils mathématiques tels que la transformée de Fourier rapide (FFT) <sup>(15)</sup> pour analyser les composantes fréquentielles d'un signal audio. Nous lui avons ensuite fait analyser un extrait audio du passage d'un train, et les résultats sont présentés dans le graphique suivant :

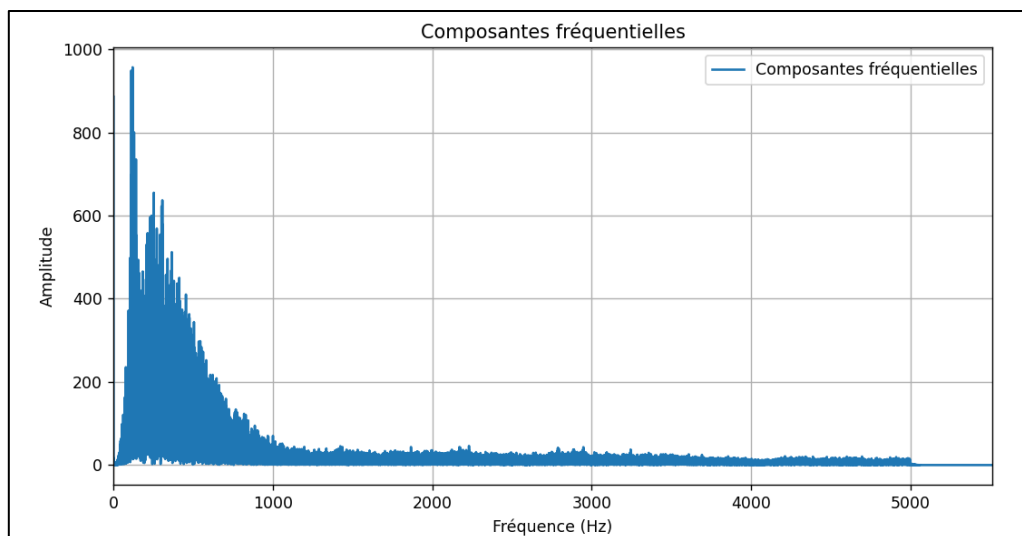


Figure 25 : Composantes fréquentielles sans atténuation ANC

L'analyse de la figure révèle que lors du passage d'un train, celui-ci émet des ondes sonores dont la fréquence oscille entre 100 et 500 Hz. Afin de minimiser efficacement les désagréments sonores, il est crucial de se concentrer sur cette plage de fréquences spécifique. En effet, il est impératif que le système ANC que nous envisageons de déployer ne réduise pas de manière uniforme toutes les fréquences audibles, ce qui serait techniquement plus simple à réaliser, mais qu'il cible uniquement celles émises par le RER.

Autrement, cela pourrait engendrer ce que l'on appelle un bruit blanc, un signal aléatoire caractérisé par une distribution uniforme de fréquences sur tout le spectre audible. En d'autres termes, il contient toutes les fréquences audibles avec la même intensité, à l'instar de la lumière blanche qui comprend toutes les couleurs du spectre visible. Techniquement, le bruit blanc est un signal aléatoire stationnaire dans le domaine temporel et non corrélé dans le domaine fréquentiel. Il est largement utilisé en ingénierie, en acoustique et en traitement du signal, notamment pour le masquage sonore.

Cependant, dans le contexte de notre projet, nous devons être conscients de son principal inconvénient : une exposition prolongée peut être perçue comme irritante ou perturbante par certaines personnes, ce qui peut entraîner des répercussions négatives sur leur bien-être mental et émotionnel. Il est important de noter que cela pourrait contrecarrer l'effet positif que nous recherchons.

### **Application électronique**

Nous disposons désormais de toutes les ressources nécessaires pour concevoir la partie électronique de la réduction active de bruit, qui produira des ondes déphasées par rapport aux fréquences ciblées. Le système ANC repose essentiellement sur deux aspects : ses propriétés acoustiques et électriques. Il utilise un microphone et un haut-parleur à transmission électronique pour produire un son d'annulation, également appelé anti-bruit. Étant donné que les caractéristiques de la source de bruit acoustique et de l'environnement varient dans le temps, ce qui constitue un phénomène non stationnaire, le système ANC doit s'adapter à ces variations. L'utilisation de filtres adaptatifs s'avère être la meilleure solution pour résoudre de telles fluctuations. Un filtre adaptatif ajuste ses coefficients afin de minimiser un signal d'erreur.

Un système ANC comprend principalement deux parties :

#### Capteurs

Les capteurs, souvent sous forme de microphones, ont pour tâche de détecter la perturbation initiale et de surveiller l'efficacité du système de contrôle en évaluant l'erreur de validation. Parmi les types de microphones les plus couramment utilisés, on trouve les microphones électrodynamiques. Ils se composent d'un conducteur enroulé

autour d'un cylindre, relié à la membrane qui le met en vibration dans un champ magnétique fixe et intense produit par un aimant permanent. Ces vibrations génèrent une force électromotrice, produisant ainsi un signal électrique.



Figure 26 : Microphone électrodynamique SENNHEISER, © Sennheiser

### Actionneurs

Les composants responsables de la modification physique de la réponse impulsionnelle du système ANC sont généralement des dispositifs électromécaniques, comme les haut-parleurs.



Figure 27 : Haut-parleur Bose, © Bose

Ces deux éléments peuvent être intégrés dans une enceinte conçue selon un modèle que nous avons développé en nous inspirant de concepts existants. Grâce à son design, cette enceinte assure une dispersion sonore efficace à 360 degrés, tant horizontalement que verticalement. Dotée d'un boîtier robuste et d'un haut-parleur résistant, elle est spécifiquement conçue pour résister aux conditions météorologiques les plus extrêmes, telles que la neige, la pluie, et des températures allant de -30 à +60°C. Son design est méticuleusement pensé pour garantir une protection efficace et une longue durée de vie des composants internes. Voici les rendus visuels de l'enceinte qui sera installée sur notre mur acoustique.



Figure 28 : Enceinte nous ayant inspiré, © Bose

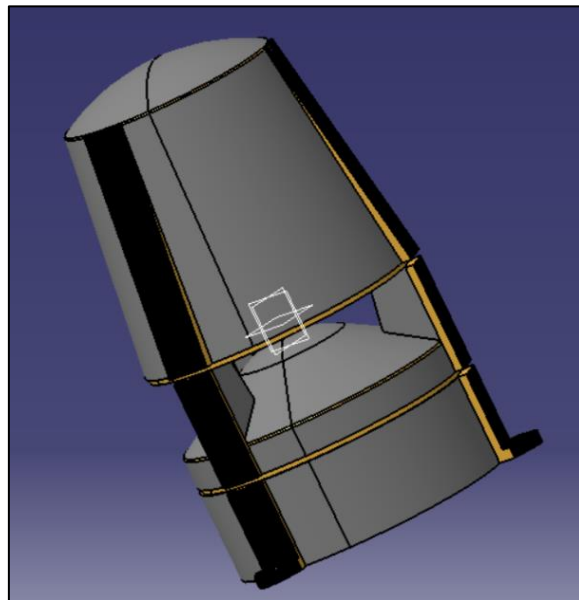


Figure 29 : Modélisation 3D de l'enceinte pour le projet, © Jules Chandelier

Lors du passage du train, le signal acoustique est capté par le microphone intégré à l'enceinte. Grâce à un traitement acoustique, le système analyse la fréquence et la longueur d'onde du signal pour ensuite envoyer une onde similaire mais déphasée au haut-parleur. Cette action permet d'annuler le bruit émis par le train, réduisant ainsi significativement son volume sonore.

Le système peut être représenté de la manière suivante :

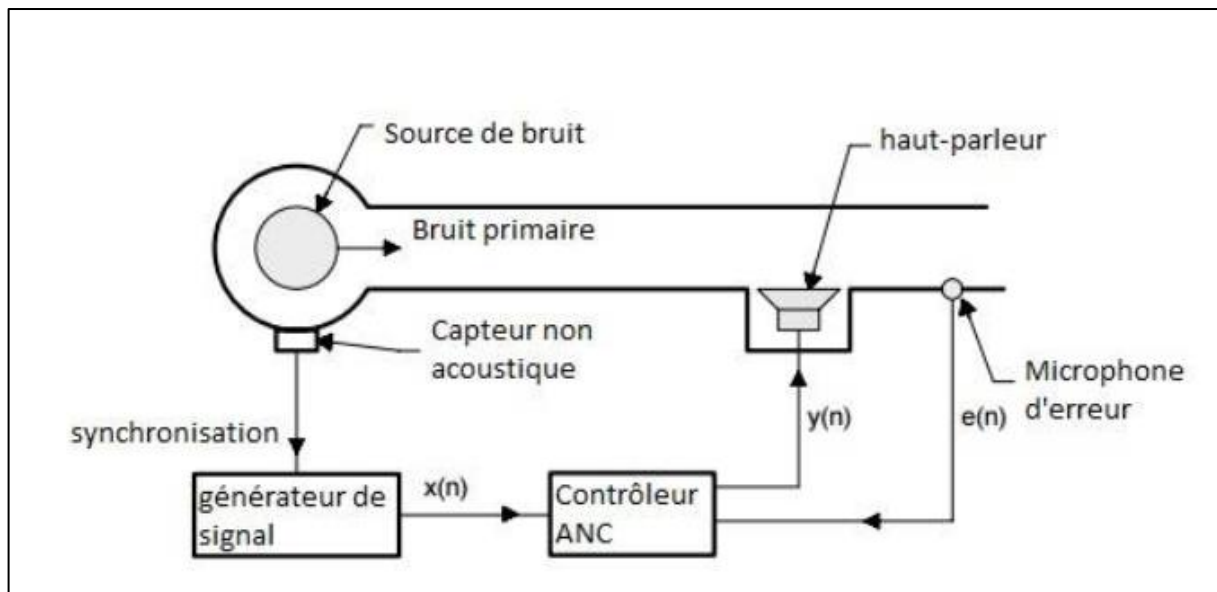


Figure 30 : Système ANC, © Instructables

## Programme Python

Pour visualiser le rendu de l'amortissement acoustique que la technologie ANC apporte à notre environnement sonore, nous rédigeons un script Python qui utilise la transformée de Fourier rapide (FFT) pour analyser les composantes fréquentielles du signal audio et identifier les fréquences à atténuer ou à supprimer, afin de se rapprocher de l'effet de l'ANC.

En appliquant un filtre spécifique dans le domaine fréquentiel, le script réduit les perturbations indésirables telles que le bruit ou les distorsions. Le signal filtré est retransformé dans le domaine temporel à l'aide de la transformée de Fourier inverse (IFFT) <sup>(16)</sup>, préservant les parties essentielles du son tout en améliorant sa clarté et sa qualité perçue. Cette approche repose sur des opérations mathématiques sophistiquées offrant ainsi une méthode efficace pour traiter les signaux audios. Voici le programme :

```
import matplotlib.pyplot as plt
from numpy import cos, sin, pi, abs, angle, arange, concatenate, exp, float64

from numpy.fft import fft, ifft

# Importe deux fonctions liées à la transformée de Fourier :
# 1) fft : Cette fonction calcule la transformée de Fourier discrète rapide d'un signal.
# Elle prend en entrée un signal dans le domaine temporel et retourne son équivalent dans le domaine fréquentiel.
# La FFT est utilisée pour analyser le contenu fréquentiel d'un signal.
# 2) ifft : Cette fonction effectue l'inverse de la FFT.
# Elle prend en entrée un signal dans le domaine fréquentiel et retourne son équivalent dans le domaine temporel.
# Cela permet de revenir au signal original après avoir appliqué des opérations dans le domaine fréquentiel.

import soundfile as sf

# bibliothèque permettant de lire un fichier audio

# Chargement du fichier audio
data, samplerate = sf.read("C://Users/chand/Desktop/filtrage/train_original.mp3")

# Paramètres liés à l'échantillonnage du signal audio
N = len(data)          # Longueur du signal audio 'data' = nombre total d'échantillons dans le signal
fe = samplerate         # Fréquence d'échantillonnage = nombre d'échantillons par seconde dans le signal
dT = 1/samplerate       # Durée d'un échantillon = inverse de la fréquence d'échantillonnage, vous obtenez le temps entre chaque échantillon
T = N/fe                # Durée totale du signal = longueur totale du signal en secondes
dF = 1 / T              # Résolution en fréquence = la plus petite différence de fréquence détectable dans le signal

# Application la transformée de Fourier rapide (FFT)
x = data
tf_x = fft(x)

tf_x = concatenate((tf_x[int(N / 2):], tf_x[:int(N / 2)])) # Réorganisation des composantes en fréquence de manière à ce que la fréquence zéro soit au centre

tf_inv = -tf_x * 0.5 # IMPORTANT : création d'un filtre en fréquence en multipliant les composantes en fréquence.
# Cela a l'effet de "supprimer" certaines fréquences du signal
```

```

tf_f = [tf_x[i] + tf_inv[i] for i in range(len(tf_x))] # Ajout des composantes en fréquence originales (tf_x) au filtre en fréquence (tf_inv).
# Cela peut être considéré comme une opération de filtrage, où vous atténuez certaines fréquences du signal.

data_f = ifft(tf_f) # Transformée de Fourier inverse (IFFT) pour revenir au domaine temporel à partir du domaine modifié.

f = arange(-dF*N/2,dF*N/2,dF) # créez un tableau de fréquences correspondant aux nouvelles composantes en fréquence réorganisées.

# Permet l'affichage du signal audio et des composantes fréquentielles dans le domaine
plt.subplot(211) # Remarque 211 = 2x1 (deux lignes, une colonne), format du graphique
plt.plot([i * dt for i in range(N)], x)

plt.subplot(212)
plt.plot(f, abs(tf_x))
plt.xlim(0,max(f))
plt.show()

# Permet l'affichage du signal audio original et du signal audio filtré + composantes fréquentielles du signal original et filtré
plt.subplot(211)
plt.plot([i * dt for i in range(N)], data)
plt.plot([i * dt for i in range(N)], data_f)

plt.subplot(212)
plt.plot(f, abs(tf_x))
plt.plot(f, abs(tf_inv))
plt.xlim(0,max(f))
plt.show()

# Enregistre le signal audio filtré dans un fichier MP3
sf.write('C:/Users/chand/Desktop/filtrage/train_filtre.mp3', float64(data_f), samplerate)

```

Figure 31 : Programme Python

Nous avons testé notre code sur plusieurs fichiers audio de passages de train afin de vérifier son bon fonctionnement. Les résultats obtenus sont présentés à travers ces graphiques :

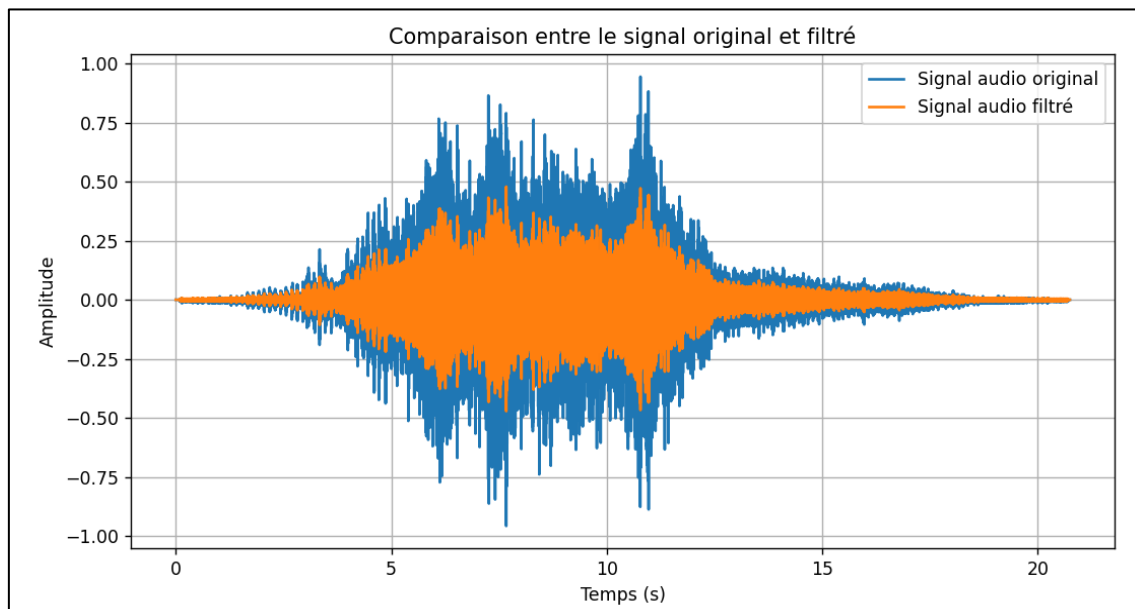


Figure 32 : Résultat Python, comparaison entre le signal original et filtré

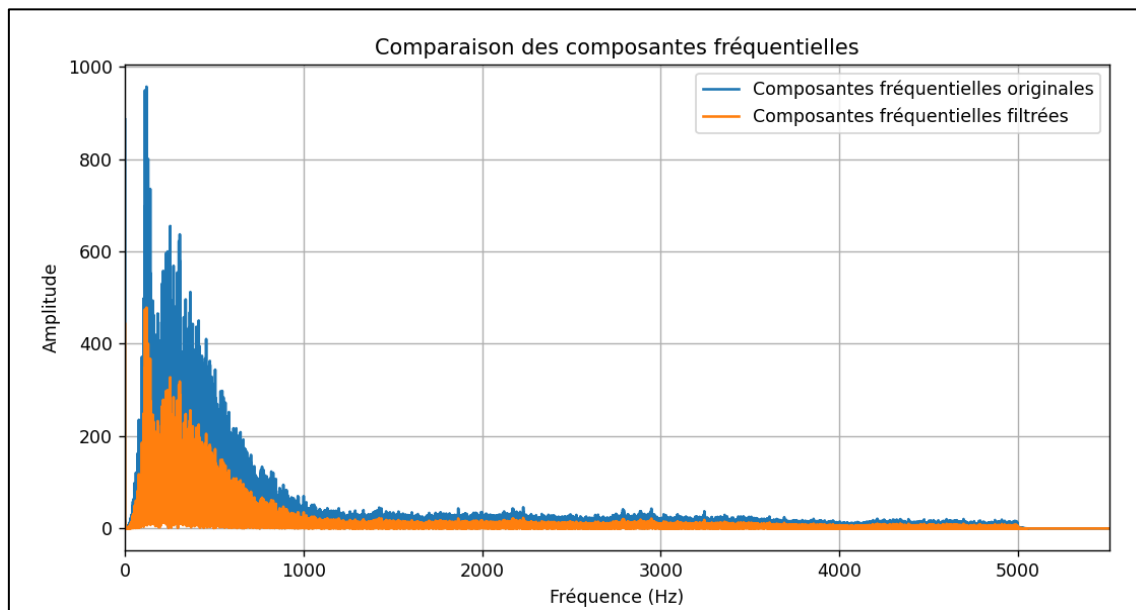


Figure 33 : Résultat Python, comparaison des composantes fréquentielles

Le premier graphique présente une comparaison entre le signal sonore original du train, représenté en bleu, et le signal audio filtré par la transformée de Fourier, en orange. Cette représentation visuelle met en lumière les bénéfices potentiels de la technologie ANC pour notre projet, à savoir une réduction de l'amplitude du signal sonore. Quant au deuxième graphique, il illustre également la diminution de l'amplitude du signal à travers ses composantes fréquentielles.

En conclusion, l'intégration de la technologie ANC dans notre environnement sonore, soutenue par l'analyse et le traitement avancé des signaux audio à l'aide de notre programme Python, offre une approche efficace pour atténuer les perturbations sonores indésirables, améliorant ainsi la qualité de notre expérience acoustique. Les tests réalisés sur des enregistrements de passages de train confirment la pertinence et l'efficacité de notre approche dans la réduction du bruit, consolidant ainsi notre stratégie globale pour la conception et l'implémentation de solutions anti-bruit innovantes.

## Tests et résultats

Pour tester l'efficacité de notre conception de mur anti-bruit, nous avons initié une série d'expériences simulées dans des conditions représentatives. Pour ce faire, nous avons utilisé un site de simulation acoustique en ligne avec des données d'un mur classique vertical, ne présentant pas les caractéristiques de courbure de notre structure. Dans ces simulations, nous avons placé un mur de 4,5 mètres de hauteur, aligné verticalement et situé à 1 mètre des voies ferrées, à une distance de 14,5 mètres d'un

immeuble voisin, lequel atteint une hauteur de 21 mètres. Nous nous plaçons dans des conditions standards avec une température de 15°C et une humidité de 50%.

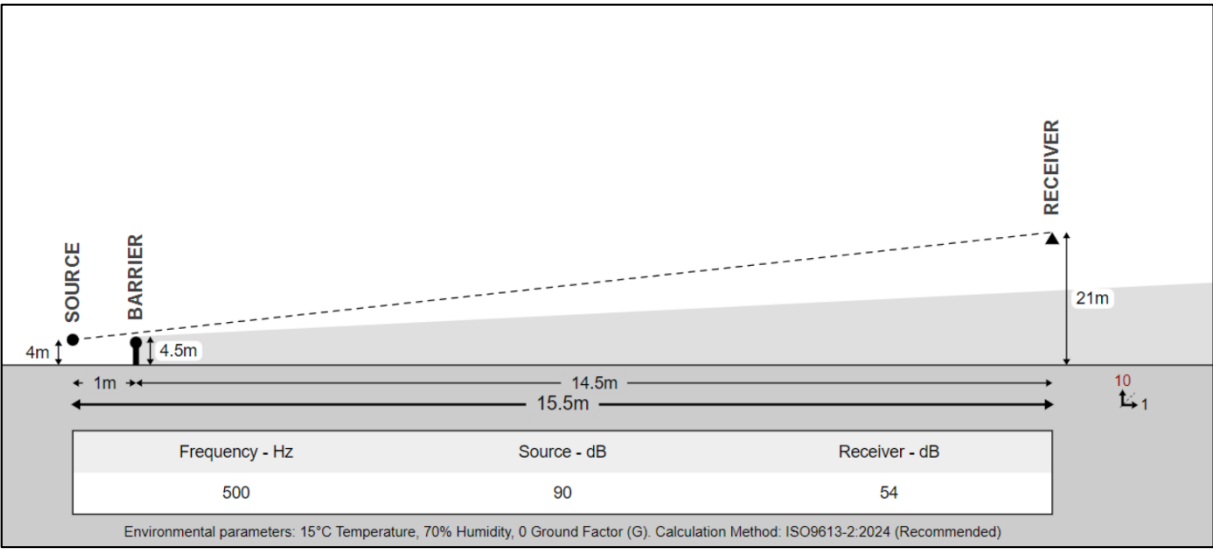


Figure 34 : Simulation du mur dans des conditions représentatives, © Noisetools

Les résultats de ces simulations sont révélateurs puisqu’avec un mur classique non courbé, les niveaux de bruit seraient suffisamment élevés pour affecter les résidents jusqu’au troisième étage de l’immeuble adjacent. Cette constatation souligne l’importance de notre approche, où la forme et les dimensions spécifiques de notre mur anti-bruit sont parfaitement adaptées pour minimiser les nuisances sonores pour les résidents environnants. De plus, avec la technologie ANC nous ajoutons une dimension supplémentaire au mur. Nous pouvons en conclure que notre mur peut s’adapter à une grande majorité des situations.

Nous avons également réalisé une autre modélisation sur l’application Noisetools afin de présenter de manière visuelle l’atténuation sonore apportée par notre mur. Pour ce faire, nous avons placé les sources sonores à une hauteur de 4 mètres, émettant un niveau sonore de 90 dB. Ces sources sont représentées par des signes plus sur la partie gauche du schéma, symbolisant le bruit émis par le TER lors de son passage.

En outre, nous avons ajouté notre mur de 4,5 mètres de hauteur, offrant une réduction de niveau sonore allant de 20 à 25 dB selon les données du logiciel. Enfin, la résidence se trouve à une distance de 14,5 mètres du mur.



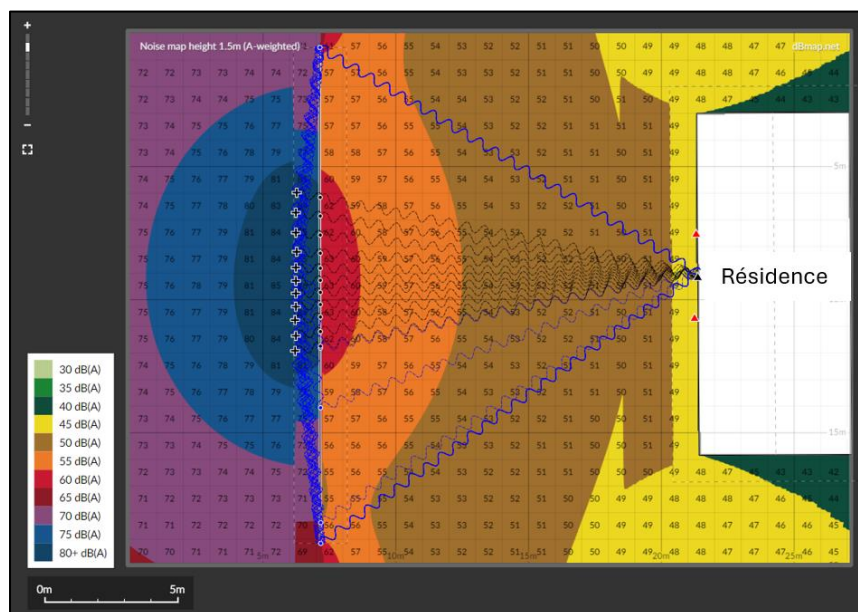


Figure 35 : Propagation des ondes sonores avec barrière, © Noisetools

À travers cette modélisation, nous observons une réduction significative du niveau sonore causé par le passage du train, passant de 90 dB à 49 dB au niveau de la résidence.

Afin de démontrer les réels bénéfices de notre mur acoustique, nous avons réalisé une deuxième expérience sans ce dernier, en conservant une configuration similaire. Voici les résultats obtenus :

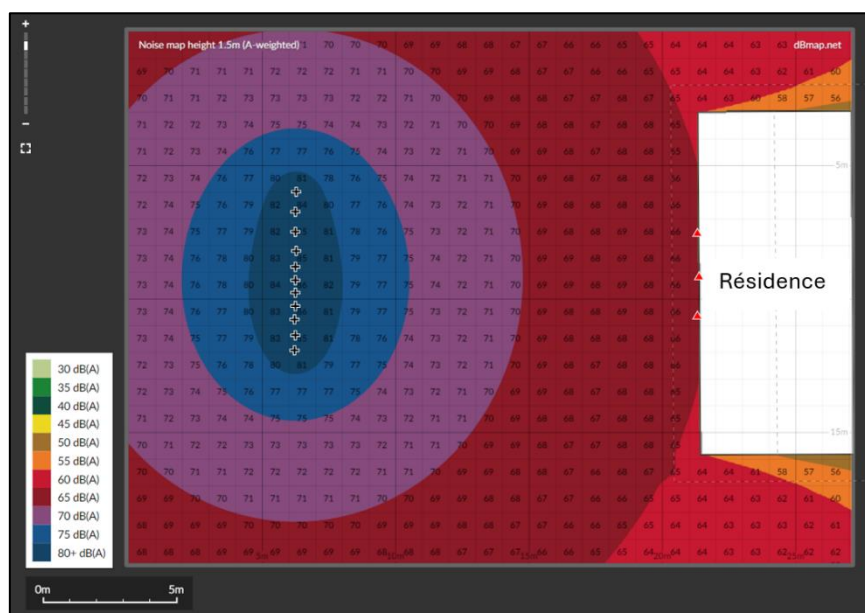


Figure 36 : Propagation des ondes sonores sans barrière, © Noisetools

Dans ce cas, la valeur sonore reçue au niveau des habitations est de 66 dB, mettant ainsi en évidence l'efficacité de la barrière anti-bruit.

---

---

## IV. Budget prévisionnel

---

---

### Estimation des coûts

D'après les matériaux utilisés et les prix associés, nous procédons à une estimation de coût pour un mur complet. Prenons une coupe horizontale du mur et définissons la surface de chaque matériau, tel que :

Ouate de cellulose :  $0,48 \text{ m}^2$  ; Fibrolithe :  $0,48 \text{ m}^2$  ; Acier S355 :  $0,24 \text{ m}^2$ .

Ainsi, nous calculons le volume de chaque matériau pour un mur :

Ouate de cellulose :  $2,16 \text{ m}^3$  ; Fibrolithe :  $2,16 \text{ m}^3$  ; Acier S355 :  $1,08 \text{ m}^3$  ; Béton :  $3,87 \text{ m}^3$

Enfin, nous déterminons le prix approximatif des matériaux pour un mur :

Matériau	Volume ( $\text{m}^3$ )	Prix	Prix (pour un mur)
Ouate	2,16	300€ / $\text{m}^3$	648€
Fibrolithe	2,16	400€ / $\text{m}^3$	864€
Poutre	/	100€ / poutre	300€
Béton	3,87	140€ / $\text{m}^3$	541,8€
Acier S355	1,08	800 / $\text{m}^3$	905€
Enceinte	/	/	1000€

$$\text{Prix total} = 300 + 648 + 864 + 905 + 541,8 + 1000 = \mathbf{4258,8\text{€}}$$

La longueur que nous voulons couvrir de la gare représente environ 310 mètres, soit la longueur de la gare RER de Choisy-le-Roi, ainsi cela représente environ 73 murs, pour un coût total en matériau de **310 892€**.

### Financement

Le financement de notre projet a nécessité des recherches approfondies et la consultation Mme Rim DERBEL, ingénieure chez Riversen, qui nous a prodigué des orientations précieuses sur les différentes options disponibles.

Parmi ces solutions nous retrouvons la SNCF Réseau et l'État qui ont conjointement alloué des ressources financières afin d'atténuer les nuisances sonores causées par le trafic ferroviaire pour les riverains concernés. Dans le cadre du dispositif France Relance couvrant la période 2020-2025, un programme dédié à l'élimination des points noirs du

bruit<sup>(17)</sup> ferroviaire a été mis en place, bénéficiant d'une enveloppe budgétaire de 120 millions d'euros. Les objectifs de ce programme sont multiples : il s'agit tout d'abord de mettre à jour et de compléter le recensement des zones les plus touchées par le bruit sur l'ensemble du territoire. Ensuite, des projets de construction de murs acoustiques seront poursuivis dans le but de réduire les émissions sonores et d'améliorer la qualité de vie des riverains.

Nous retrouvons également le dispositif d'aide pour la faisabilité de l'innovation de Bpifrance vise à financer les projets d'innovation technologique, créative, artistique ou culturelle se trouvant en phase de maturation ou de faisabilité. Il soutient divers types de projets de recherche, développement et innovation (RDI), ainsi que des initiatives créatives et culturelles. Les dépenses éligibles comprennent les études d'évaluation, la conception de projets, la validation de leur faisabilité technique et économique, ainsi que d'autres coûts liés au développement. Bpifrance offre une subvention pouvant atteindre 50 000 € pour des programmes d'innovation d'une durée de 6 à 24 mois, avec un taux d'aide pouvant aller jusqu'à 70% selon le profil de l'entreprise.

Un autre type d'aide auquel notre projet pourrait prétendre est le « fond vert ». Créé en 2023 par le Ministère de la Transition écologique, cette aide vise à soutenir les collectivités dans l'amélioration de leur performance environnementale, l'adaptation de leur territoire au changement climatique et l'embellissement de leur cadre de vie. En 2024, le gouvernement a décidé de pérenniser ce fonds afin d'accompagner les collectivités territoriales, ainsi que leurs partenaires publics ou privés, dans la réalisation de projets répondant aux enjeux de la planification écologique.

Notre projet de construction de murs acoustiques pour réduire les nuisances sonores liées au trafic ferroviaire s'aligne avec les objectifs du programme "Fonds Vert". En atténuant les émissions sonores le long des voies ferrées, nous contribuons à la préservation de l'environnement et au bien-être des communautés locales. De plus, ce projet favorise une mobilité urbaine durable grâce à des solutions innovantes respectueuses de l'environnement. Le programme "Fonds Vert" propose 19 types d'aides. En examinant ces options, nous avons trouvé que notre projet correspond aux critères de l'aide "Appui à l'ingénierie - Mesure transverse". Cela signifie que nous sommes éligibles pour une assistance technique, ainsi que pour des subventions pouvant couvrir jusqu'à 80% des coûts du projet.

## Rentabilité

L'installation de notre projet SonoShield se distingue par son véritable intérêt en termes de rentabilité notamment dans le contexte actuel où le coût global des nuisances sonores en France est un sujet d'importance croissante, comme en témoigne une étude réalisée par le Conseil national du bruit (CNB) et l'Agence de la transition écologique (ADEME) en 2021. Selon cette étude, les nuisances sonores représentent un coût

économique colossal de 156 milliards d'euros par an pour le pays. Ce chiffre impressionnant prend en compte l'influence sur la santé des Français ainsi que son influence sur l'économie dans son ensemble.

Pour mieux cerner cette somme, il convient de souligner que les deux tiers (66,5%) des coûts sont attribuables aux transports : le bruit routier représente à lui seul 54,8% des dépenses, suivi du bruit ferroviaire avec 7,6% et du bruit aérien avec 4,1%. Ces chiffres mettent en évidence le poids considérable des nuisances sonores causées par les moyens de transport dans le coût global supporté par la société française.

Pour mettre en perspective cette somme, il est important de noter qu'en 2016, le coût des nuisances sonores était estimé à 57 milliards d'euros. Cette augmentation significative démontre l'ampleur croissante du problème. Cette hausse spectaculaire met en évidence l'urgence d'agir pour atténuer les effets néfastes des nuisances sonores sur la société française.

Ces coûts sont liés à divers facteurs, notamment les dépenses de santé engendrées par les troubles auditifs, les problèmes de sommeil et les troubles de stress liés au bruit. De plus, les nuisances sonores peuvent également entraîner des répercussions sur la productivité au travail, les performances académiques des étudiants et la qualité de vie en général, ce qui se traduit par des coûts économiques indirects considérables.

De plus d'après l'OMS, les nuisances sonores figure parmi les principaux facteurs de risque environnementaux en Europe, juste après la pollution atmosphérique. Chaque année, au moins un million d'années de vie en bonne santé sont perdues en raison du bruit lié à la circulation, entraînant des problèmes de santé sérieux tels que les maladies cardiovasculaires, les troubles et des problèmes psychologiques. Ainsi l'installation de solutions acoustiques comme notre projet de barrières anti bruit peut-être une stratégie efficace pour minimiser les nuisances sonores dans divers environnements, ce qui pourrait contribuer à réduire les coûts associés aux problèmes de santé et à améliorer la productivité économique globale.

Un autre point important concernant la rentabilité de ce projet est l'aspect immobilier. En effet, la présence de nuisances sonores peut entraîner des conséquences significatives sur la valeur immobilière d'un bien. Les acheteurs potentiels sont souvent sensibles à la qualité de vie et à la tranquillité de leur environnement, et les nuisances sonores peuvent être perçues comme un inconvénient majeur. En discutant avec des agents immobiliers de l'agence Orpi à Chambourcy nous avons découvert que la présence de telles nuisances peut faire diminuer le prix d'un bien de 15 à 20%. Cette baisse de valeur s'explique par le fait que les nuisances sonores peuvent rendre un logement moins attractif pour les acheteurs potentiels. Ces derniers peuvent craindre d'être dérangés par le bruit constant et peuvent être moins enclins à investir.

Ainsi l'installation d'un dispositif tel que SonoShield pourrait avoir de nombreux avantages. En effet, en réduisant efficacement les bruits liés aux trains cela laisserait place à un environnement calme et paisible, ce qui le rendrait plus attrayant pour les acheteurs potentiels. En conséquence, cela peut contribuer à revaloriser les logements présents dans un quartier ou un immeuble en améliorant leur attractivité et en les rendant plus compétitifs sur le marché immobilier. Pour les propriétaires de biens immobiliers, cela représente une opportunité d'augmenter la valeur de leur propriété et de maximiser leur retour sur investissement.

---

---

## V. Conclusion

---

---

Après avoir examiné en détail chaque aspect de notre projet, il est clair que notre approche innovante offre bien plus qu'une simple réduction du bruit causé par le trafic ferroviaire. En combinant la technologie ANC à un mur anti-bruit conventionnel, nous proposons une solution qui va au-delà de la simple atténuation du bruit. Notre projet vise à créer des environnements sonores plus agréables et plus paisibles pour les communautés environnantes, tout en offrant des avantages économiques et sociaux considérables.

Les simulations et les modélisations que nous avons réalisées fournissent des preuves tangibles de l'efficacité de notre mur anti-bruit, démontrant une réduction significative du niveau sonore émis par le passage des trains. Cela non seulement améliore la qualité de vie des résidents en réduisant les nuisances sonores, mais contribue également à préserver leur santé mentale et physique en créant des espaces plus calmes et moins stressants.

En outre, l'intégration de la technologie ANC ajoute une dimension supplémentaire à notre solution en offrant une réduction encore plus efficace du bruit. Cette technologie adaptative permet d'atténuer spécifiquement les fréquences sonores émises par le trafic ferroviaire, offrant ainsi une protection supplémentaire contre les bruits indésirables.

Sur le plan économique, notre projet présente également des avantages significatifs. En réduisant les coûts associés aux nuisances sonores, tels que les dépenses de santé liées aux troubles auditifs et aux problèmes de sommeil, notre initiative contribue à économiser des ressources financières précieuses. De plus, en améliorant la qualité de vie et en réduisant les perturbations causées par le bruit, notre projet peut également augmenter la valeur des propriétés immobilières dans la région, offrant ainsi un retour sur investissement attractif pour les parties prenantes.

Enfin, notre projet s'inscrit parfaitement dans une perspective environnementale et durable en contribuant à réduire l'empreinte sonore du trafic ferroviaire et à préserver la santé des écosystèmes environnants. En offrant une solution innovante et efficace pour atténuer les effets négatifs du bruit, notre projet joue un rôle crucial dans la promotion d'un développement urbain plus respectueux de l'environnement et des populations locales.



Figure 37 : Modélisation 3D via COMSOL, © Gaspard Chandelier

En somme, notre initiative représente une réponse proactive et globale aux défis posés par les nuisances sonores du trafic ferroviaire. Grâce à une approche intégrée, technologiquement avancée et socialement responsable, notre projet offre une solution durable pour améliorer la qualité de vie des communautés environnantes tout en favorisant le développement économique et environnemental de la région.

---

## **VI. Réponses aux objections attendues**

---

**1) Pourquoi avez-vous choisi de vous concentrer sur l'isolation phonique dans votre projet ? Y a-t-il des considérations spécifiques qui ont motivé ce choix ?**

Nous avons choisi de nous concentrer sur l'isolation phonique dans notre projet en raison de son importance dans de nombreux contextes, notamment dans les environnements urbains densément peuplés, les bâtiments résidentiels et commerciaux, ainsi que les infrastructures de transport. L'isolation phonique contribue au confort des occupants, à la santé mentale, et à la qualité de vie en réduisant les niveaux de bruit indésirable. De plus, une bonne isolation phonique peut être nécessaire pour se conformer aux normes de construction et de sécurité dans certains secteurs.

**2) Vous mentionnez plusieurs types d'isolants, y compris les isolants minéraux, naturels et synthétiques. Comment avez-vous déterminé quel type d'isolant était le plus approprié pour votre projet ? Quels critères avez-vous pris en compte dans votre analyse ?**

Dans le choix des matériaux d'isolation phonique, nous avons pris en compte plusieurs facteurs, notamment leur capacité à fournir une isolation acoustique efficace, leur durabilité, leur influence sur l'environnement, leur coût et leur facilité d'installation. Nous avons également examiné les caractéristiques spécifiques de notre projet, telles que le type de structure du bâtiment, les exigences réglementaires, et les préférences des clients ou des occupants.

**3) Vous avez mentionné que les murs en béton offrent généralement une meilleure isolation que les murs en plâtre. Comment avez-vous pris en compte la nature de la structure du bâtiment dans votre sélection de matériaux d'isolation ?**

Nous avons pris en compte la nature de la structure du bâtiment dans notre sélection de matériaux d'isolation en reconnaissant que différents types de structures peuvent influencer l'efficacité de l'isolation phonique. Par exemple, les murs en béton ont tendance à offrir une meilleure isolation que les murs en plâtre en raison de leur densité et de leur masse, ce qui peut aider à atténuer les vibrations sonores. Nous avons ajusté nos choix de matériaux en fonction de ces considérations pour garantir une performance acoustique optimale.



#### **4) Pourriez-vous nous parler des considérations financières liées à la main d'œuvre ?**

Afin de concevoir un mur avec la même forme que celui décrit dans notre projet il nous faut sous-traiter cette opération à une entreprise qui va partir des matériaux bruts et qui va livrer le mur finalisé. Nous ne pouvons également pas fournir une estimation précise du prix de la main-d'œuvre car celui-ci peut varier considérablement en fonction de plusieurs facteurs.

Tout d'abord, les taux horaires des travailleurs peuvent différer d'une région à l'autre, et même à l'intérieur d'une même région, en raison de variations dans le coût de la vie et de la demande de main-d'œuvre. De plus, le coût de la main-d'œuvre peut être influencé par la complexité de l'installation des isolants phoniques, ainsi que par la disponibilité de travailleurs qualifiés. Si une tâche d'installation nécessite des compétences spécialisées ou une formation particulière, les coûts de la main-d'œuvre peuvent être plus élevés.

En outre, les conditions du marché du travail, telles que l'offre et la demande de travailleurs qualifiés, peuvent avoir une influence sur les prix de la main-d'œuvre. En période de forte demande ou de pénurie de main-d'œuvre, les entreprises peuvent être amenées à augmenter leurs tarifs pour attirer et retenir les travailleurs qualifiés.

# Bibliographie-Webographie

## Contexte

- L'info Economique (8 janvier 2024) – Histoire et développement du transport ferroviaire, industrie et économie du chemin de fer  
<https://linfoeconomique.fr/2024/01/08/lindustrie-ferroviaire-francaise-un-savoir-faire-historique/>
- Association JNA (2023) – Echelle des décibels et volume sonore du quotidien  
<https://www.journee-audition.org/pdf/guide-decibels.pdf>
- IFOP (février 2022) – Sondage nuisance sonore, perception, dangers, risques, conséquences santé <https://www.ifop.com/wp-content/uploads/2022/03/Enquete-Ifop-JNA-2022-Bruit-et-sante.pdf>
- Département du Val-de-Marne (octobre 2020) – Etat de la pollution sonore dans notre environnement, cartographie, objectifs de réduction du bruit  
[https://www.valdemarne.fr/sites/default/files/actions/rapport-ppbe-et-annexes-2020\\_0.pdf](https://www.valdemarne.fr/sites/default/files/actions/rapport-ppbe-et-annexes-2020_0.pdf)
- Sénat (05 avril 2018) – Réglementation, lutte contre le bruit, dispositions réglementaires, seuils sonores  
<https://www.senat.fr/questions/base/2018/qSEQ180404239.html>
- Bruitparif, observatoire du bruit en Île-de-France (9 septembre 2012) – Cartes de bruit stratégiques, exposition sonore, dépassement valeur seuil  
<https://www.bruitparif.fr/publications/>
- European Environment Agency (5 mars 2020) – Exposition nuisances sonores, pollution au bruit, effet sur la santé, mesures de réductions  
<https://www.eea.europa.eu/fr/highlights/augmentation-attendue-du-nombre-d2019europeens>
- Centre d'observation de la société (18 septembre 2023) – Urbanisation, croissance économique, développement) <https://www.observationsociete.fr/territoires/lieu-de-vie-terri/la-part-de-la-population-vivant-en-ville-plafonne/>

## Modalités d'application

- Engie (02 septembre 2022) – Types isolants phonique, prix, avantages et inconvénients <https://particuliers.engie.fr/economies-energie/conseils-economies-energie/conseils-travaux-renovation/meilleur-isolant->

[phonique.html#:~:text=Il%20existe%20une%20multitude%20d,%2C%20panneaux%2C%20vrac%20et%20flocons](#)

- SAMSE – Choix matériaux acoustiques, utilisations, caractéristiques  
<https://www.samse.fr/guide-isolation/quels-materiaux-pour-isolation-phonique>
- Bruitparif.fr - Propagation des ondes sonores, spécificités du son rôle écran acoustiques <https://www.bruitparif.fr/pages/En-tete/700%20Accompagner/700%20PPBE%20en%20IdF/600%20Les%20solutions%20techniques%20pour%20lutter%20contre%20le%20bruit/860%20Lutter%20contre%20le%20bruit%20routier%20-%20Construire%20un%20%C3%A9cran%20acoustique.pdf>
- HAL open sciences, par Marine Baulac (septembre 2009) – Optimisation des protections anti-bruit, caractéristiques des ondes sonores  
<https://theses.hal.science/tel-00415879/document>
- Bruit.fr – Caractérisation acoustique d'une voie ferrée, niveaux de bruit, propagation  
[https://www.bruit.fr/images/acoustique\\_techniques/AT46-47-24-33\\_compressed.pdf](https://www.bruit.fr/images/acoustique_techniques/AT46-47-24-33_compressed.pdf)
- Philips - Fonctionnement technologie ANC <https://www.philips.fr/c-e/so/sound-hub/comment-fonctionne-un-casque-a-reduction-de-bruit>
- Les numériques, par Louis Paillat (15 mai 2023) – Réduction de bruit active, isolation passive, mode de fonctionnement <https://www.lesnumeriques.com/casque-audio/comprendre-reduction-bruit-active-a1687.html>
- Mémoire de fin d'Etudes par Bouzidi Mohammed et Yahiaoui Chouaib (2017) – Système électronique et composition de l'ANC, mis en place et fabrication  
<https://di.univ-blida.dz/jspui/bitstream/123456789/2504/1/PFE.pdf>

## **Budget prévisionnel**

- CidB, Centre d'information sur le Bruit, Enquête CNB et ADEME (juin 2021) – Coût social du bruit en France <https://bruit.fr/quoi-de-neuf/les-chiffres-du-bruit>
- Le Point.fr (22 juillet 2021) - chiffres nuisances sonores, économie, conséquence sur la santé [https://www.lepoint.fr/societe/les-nuisances-sonores-coutent-156-milliards-d-euros-par-an-22-07-2021-2436450\\_23.php](https://www.lepoint.fr/societe/les-nuisances-sonores-coutent-156-milliards-d-euros-par-an-22-07-2021-2436450_23.php)
- gouv.fr – Pollution sonore, risques sur la santé, facteurs d'exposition  
<https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/sante/article/les-bruits-et-les-nuisances->

[sonores#:~:text=Selon%20l'OMS%2C%20le%20bruit,bruit%20caus%C3%A9%20par%20la%20circulation](#)

- SNCF/27 novembre 2023 - Programme de subvention, résorption des points noirs bruit <https://www.sncf-reseau.com/fr/developpement-durable/bruit-ferroviaire/le-programme-de-resorption-des-points-noirs-bruit-2020-2025>
- Bpifrance – Principales aides spécifiques aux projets, innovation, démarches, financement <https://bpifrance-creation.fr/encyclopedie/aides-a-creation-a-reprise-dentreprise/aides-a-linnovation/recapitulatif-principales>
- gouv.fr - Dispositif financement, aide en ingénierie <https://aides-territoires.beta.gouv.fr/programmes/fonds-vert/>
- Travaux à part – Tarifs matériaux acoustiques <https://www.travauxapart.fr/guides/prix-dun-mur-anti-bruit>

## Table des illustrations

- Figure 1 : *La Gare Saint-Lazare*, Claude Monet, 1877, © Musée d'Orsay – Page 11
- Figure 2 : Echelle des décibels, © Association JNA – Page 13
- Figure 3 : Sondage Ifop pour l'association JNA, question 1, © Ifop – Page 14
- Figure 4 : Sondage IPSA, question 1 – Page 14
- Figure 5 : Sondage Ifop pour l'association JNA, question 2, © Ifop – Page 15
- Figure 6 : Département du Val-de-Marne, © Association Bruitparif – Page 16
- Figure 7 : Fonctionnement de l'écholocalisation, © Socratic – Page 17
- Figure 8 : Mur anti-bruit conventionnel, © ITS Acoustique – Page 18
- Figure 9 : Ouate de cellulose, © La Maison naturelle – Page 21
- Figure 10 : Polyuréthane, © Ootravaux – Page 21
- Figures 11 et 12 : Schéma d'une section, © Calculs Eurocodes – Page 23
- Figures 13 et 14 : Schéma du projet, © Gaspard Chandelier – Page 25
- Figures 15 et 16 : Schéma diffraction et dimensionnement, © SILENZO – Page 26
- Figure 17 : Modélisation 3D de la barrière, © Nima Kashani – Page 28
- Figure 18 : Vue de face de la barrière, © Nima Kashani – Page 28
- Figure 19 : Vue de dos de la barrière, © Nima Kashani – Page 28
- Figure 20 : Vue inclinée de dessous de la barrière, © Nima Kashani – Page 29
- Figure 21 : Réduction de bruit active, © Bang-olufsen – Page 29
- Figure 22 : Déphasage de l'onde, © Le Casque Parfait – Page 30
- Figure 23 : Niveau de bruit émis en fonction de la vitesse du train, © Bruit FR – Page 31
- Figure 24 : Génération et émission du bruit de roulement, © BruitParif – Page 31
- Figure 25 : Composantes fréquentielles sans atténuation ANC – Page 32
- Figure 26 : Microphone électrodynamique SENNHEISER, © Sennheiser – Page 34
- Figure 27 : Haut-parleur Bose, © Bose – Page 34
- Figure 28 : Enceinte nous ayant inspiré, © Bose – Page 35
- Figure 29 : Modélisation 3D de l'enceinte pour le projet, © Jules Chandelier – Page 35
- Figure 30 : Système ANC, © Instructables – Page 36
- Figure 31 : Programme Python – Page 37
- Figure 32 : Résultat Python, comparaison entre le signal original et filtré – Page 37
- Figure 33 : Résultat Python, comparaison des composantes fréquentielles – Page 38
- Figure 34 : Simulation du mur, © Noisetools – Page 39
- Figure 35 : Propagation des ondes sonores avec barrière, © Noisetools – Page 40
- Figure 36 : Propagation des ondes sonores sans barrière, © Noisetools – Page 40
- Figure 37 : Modélisation 3D via COMSOL, © Gaspard Chandelier – Page 46

## Résumé

SonoShield est une solution innovante pour atténuer les nuisances sonores du trafic ferroviaire, combinant un mur anti-bruit conventionnel avec la technologie ANC. Grâce à des simulations et des modélisations, nous avons démontré l'efficacité de notre approche en réduisant significativement les niveaux sonores des trains, offrant ainsi des environnements plus paisibles. Sur le plan économique, notre projet réduit les coûts associés au bruit tout en augmentant la valeur immobilière des propriétés locales. En alignement avec des objectifs environnementaux et durables, SonoShield contribue à réduire l'empreinte sonore du trafic ferroviaire, favorisant ainsi un développement urbain respectueux de l'environnement et des populations locales.

Mots clés : Nuisances sonores, mur anti-bruit, technologie ANC, environnement urbain

## Abstract

SonoShield is an innovative solution for attenuating noise from rail traffic, combining a conventional noise barrier with ANC technology. Through simulations and modelling, we have demonstrated the effectiveness of our approach in significantly reducing train noise levels, resulting in quieter environments. In economic terms, our project reduces noise-related costs while increasing the real estate value of local properties. Aligned with environmental and sustainability objectives, SonoShield helps to reduce the noise footprint of rail traffic, promoting urban development that respects the environment and local populations.

Key words : Noise pollution, noise barrier, ANC technology, urban environment