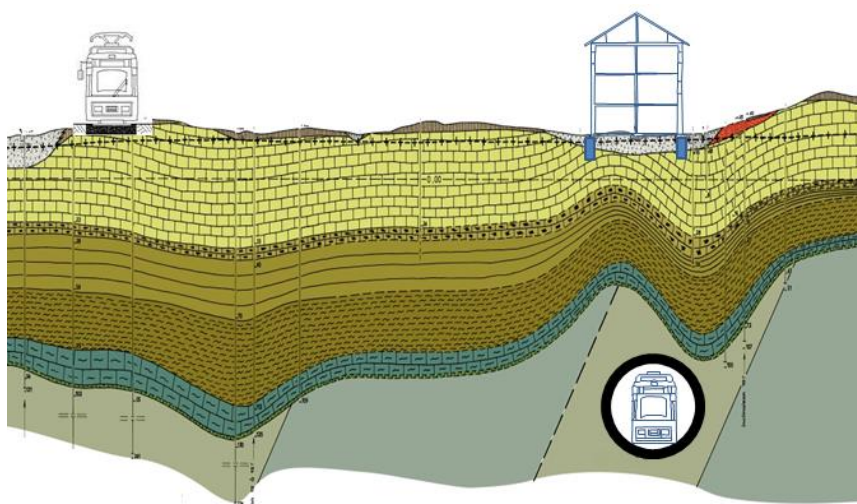


# MEFISSTO

## Le logiciel dédié aux vibrations environnementales et à l'interaction sol-structure

MEFISSTO est un logiciel de calcul numérique dédié à la propagation des vibrations dans le sol et les structures. Il se base sur deux méthodes numériques complémentaires (FEM et BEM), ce qui en fait l'outil idéal pour traiter de nombreux problèmes physiques en lien avec les vibrations environnementales et l'interaction sol-structure. Il permet par exemple de dimensionner des systèmes de réductions des vibrations transmises aux bâtiments ou de prévoir les vibrations en surface dues au passage d'un train dans un tunnel.

MEFISSTO suppose que les domaines sont isotropes et homogènes, et que la propagation est linéaire. Cet outil résout donc les équations de l'élasto-dynamique linéaire, et ce dans le domaine fréquentiel.



*Vue en coupe du type de problème physique traité par MEFISSTO*

### Modélisation 2D et 2.5D

La spécificité de MEFISSTO est de permettre des calculs en 2D et en 2.5D.

En modélisation 2D, toute la physique du problème (géométrie, source, etc.) sont décrits dans un plan vertical de coupe et sont considérés invariants dans la troisième direction horizontale. En conséquence, en 2D l'excitation peut être vue comme une ligne source cohérente, situation quasiment jamais rencontrée dans les situations réelles.

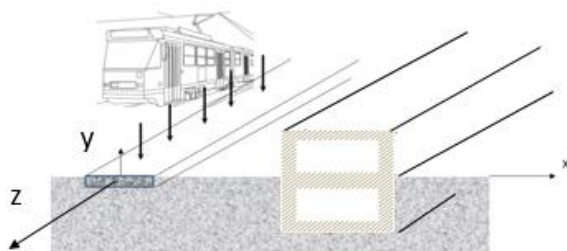
En modélisation 2.5D, la géométrie reste invariante le long de la troisième direction horizontale (un tunnel infiniment long par exemple) mais l'excitation n'est plus invariante dans cette direction. On peut ainsi modéliser une ou plusieurs forces ponctuelles in 3D, n'importe où dans l'espace, ce qui est un modèle bien plus réaliste pour des sources de vibrations réelles. La description de la géométrie reste cependant très simple puisqu'elle reste définie dans un plan vertical uniquement (en 2D).

Des comparaisons entre mesures et calculs ont montré que dans de nombreux cas (niveau de vibration induit par le passage d'un train par exemple), la modélisation 2.5D donne de bien meilleurs résultats que la modélisation 2D. En fait, les calculs 2D ont tendance à surestimer les niveaux de vibrations ce qui peut induire un surdimensionnement des fondations ou des systèmes de protections, et de ce fait un coût supplémentaire important dans les traitements antivibratoires. La modélisation en 2.5D permet donc de concevoir et dimensionner les systèmes de traitement vibratoire de manière plus exacte et plus économique.

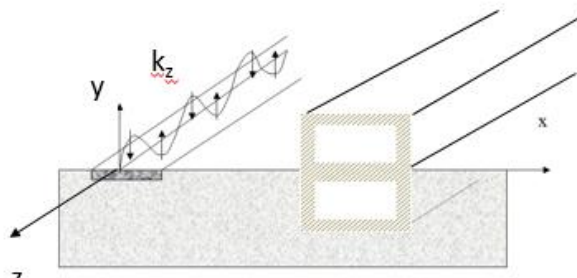
De plus, un autre avantage de la modélisation en 2.5D en comparaison à une modélisation complète en 3D, en sus de la plus grande simplicité de saisie, est que de nombreux problèmes 3D peuvent être bien approximatés par une modélisation en 2.5D. En effet, dans de nombreux cas, un calcul 2.5D – qui suppose une géométrie infiniment étendue dans une dimension – donne des résultats très similaires à un calcul 3D complet – qui lui prend en compte les effets de taille finie. Cela est dû au fait que comme la dissipation est importante dans les sols, même une structure de 10m de long se comporte quasiment comme un structure infiniment longue (ce que le calcul 2.5D suppose).

## Aspects théoriques et calculatoires de la modélisation 2.5D

D'un point de vue théorique, un calcul 2.5D est effectué en résolvant un ensemble de sous-problèmes 2D, chacun correspondant à un nombre d'onde horizontal  $k_z$ . Pour obtenir la solution 2.5D, il faut effectuer une intégration sur les différentes valeurs de  $k_z$  pour chaque position de source ponctuelle (voir l'image ci-dessous).



**Problème 2.5D : plusieurs forces ponctuelles**



**Sous problème 2D pour un nombre d'onde  $k_z$**

Le temps de calcul supplémentaire nécessaire pour effectuer un calcul 2.5D est largement inférieur à ce qui serait nécessaire à un calcul 3D. De plus, les calculs pour toutes les valeurs du nombre d'onde et pour toutes les fréquences sont indépendants et peuvent donc aisément être lancés en parallèle.

## Méthodes numériques : FEM et BEM

Deux méthodes numériques complémentaires sont implémentées dans MEFISSTO : la FEM et la BEM.

La FEM (méthodes des éléments finis) se base sur le fait que chaque domaine est décomposé en petits éléments surfaciques. Les variables de champ dans chaque domaine sont ensuite décrites grâce aux valeurs nodales (valeurs du champ sur le maillage).

Dans l'approche BEM (méthode des éléments finis de frontière), les variables de champ sont décrites grâce aux valeurs sur les frontières de ce domaine. La connaissance du champ sur le contour du domaine est donc suffisante pour le décrire complètement.

Par définition, la FEM ne peut pas modéliser des domaines infinis, tandis que la BEM est bien adaptée pour de tels domaines. Les domaines de taille finie et étroits (comme par exemples les structures de bâtiment ou encore un tunnel) sont par contre mieux modélisés avec la FEM, bien que la BEM puisse être utilisée malgré tout.

Dans les deux méthodes, la taille maximale des éléments doit être une fraction de la plus petite longueur d'onde considérée, qui dépend de la fréquence et des propriétés physiques des différents domaines. Cet aspect est facilement pris en compte dans MEFISSTO car un critère de maillage est précisé pour chaque segment de la géométrie.

## Module de calcul de pression acoustique dans des volumes

Pour calculer un niveau de bruit solidien, il est aussi possible dans MEFISSTO de définir des volumes acoustiques parallélépipédiques dans lesquels on effectue un calcul en post-traitement du champ acoustique rayonné par les parois vibrantes du volume. Une approche originale mêlant résultats 2.5D et couplage modal 3D (dénommée approche 2D3/4) permet ainsi d'obtenir une information précise et rapide de bruit solidien à l'intérieur des bâtiments.

## Paramètres d'entrée

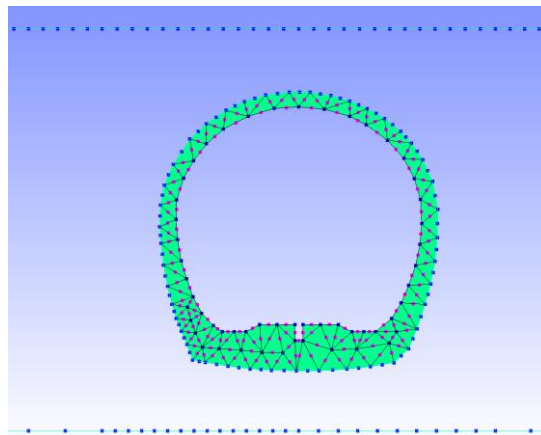
### (1) Géométrie

Dans MEFISSTO, les données géométriques sont décrites simplement par une liste de segments droits ou d'arcs de cercle, qui sont les frontières de tous les domaines considérés (qu'ils soient décrits en BEM ou en FEM). A chaque fréquence, le maillage est effectué automatiquement en divisant tous les segments selon la plus petite longueur d'onde considérée. L'implémentation de la géométrie est donc très simple.

On peut également définir des « conduits » acoustiques, utilisables en post-traitement pour le calcul des niveaux de bruit solidien dans des volumes acoustiques. Un conduit se définit simplement par 4 segments formant un rectangle fermé.

La surface du sol et toutes les interfaces entre couches horizontales, qui sont typiquement des lignes infinies, sont modélisées en BEM comme des lignes de taille importante mais finie, adaptée automatiquement en fonction de la fréquence. Cette approximation n'induit aucune perte de précision de la méthode.

L'image ci-dessous montre un exemple de maillage hybride for un problème de tunnel placé dans une couche de sol. Le maillage BEM consiste en deux interfaces horizontales auquel on rajoute le contour extérieur du tunnel. Le tunnel lui-même est représenté par un maillage FEM de triangles à six nœuds.



**Exemple d'un maillage hybride : maillage FEM pour le tunnel et maillage BEM pour les couches de sol**

## **(2) Propriétés des matériaux**

Le matériau constituant de chaque domaine est décrit par quatre paramètres : module d'Young ( $E$ ), masse volumique ( $\rho$ ), facteur de perte ( $\eta$ ) et coefficient de Poisson ( $\nu$ ).

## **(3) Milieux de propagation**

Un milieu de propagation est défini par un numéro, un matériau, une méthode numérique (FEM ou BEM) et un ensemble de segments qui définissent sa frontière.

## **(4) Positions des sources**

Dans MEFISSTO, seules les forces ponctuelles sont utilisables. Il faut cependant garder à l'esprit que grâce au 2.5D, une seule position de force dans le plan de définition géométrique peut correspondre à un ensemble de forces ponctuelles incohérentes dans la troisième direction (le long d'une ligne de train par exemple).

## **(5) Position des récepteurs**

Les récepteurs peuvent être définis comme des points isolés, des axes, des zones de moyennage ou des cartes dans n'importe quelle direction, dans les domaines de propagation des vibrations ainsi que dans les volumes acoustiques.

## Données de sortie

L'utilisateur peut choisir comme données de sortie le champ vibratoire (déplacement, vitesse ou accélération) ou le niveau acoustique (dans les volumes intérieurs définis comme volumes acoustiques) calculé aux différents points récepteurs. Les trois composantes du champ vibratoire sont calculées et sauvegardées dans tous les cas. MEFISSTO génère des fichiers textes ainsi que des fichiers au format GMSH.

Les deux types de résultats sont :

- Spectres : solutions aux différents points récepteurs, en fonction de la fréquence
- Cartes de champ (voir les exemples ci-dessous)

L'utilisateur peut ensuite appliquer toute sorte de post-traitement aux résultats : intégration par tiers d'octave, tracé de courbes, visualisation de cartes en 3D, etc.

## Package Scilab pour Mefissto

Pour faciliter la mise en donnée ainsi que le traitement des fichiers texte générés par Mefissto, un ensemble de fonctions utilisables dans l'outil de calcul numérique gratuit Scilab<sup>1</sup> a été développé. Ces fonctions sont distribuées gratuitement avec Mefissto. Elles permettent notamment les actions suivantes :

- > Importer la géométrie (compréhensible par Mefissto) depuis un fichier DXF bien formaté
- > Tracer une géométrie qui a été définie pour s'assurer de sa justesse
- > Tracer les maillages et les cartes générées (en utilisant le logiciel gratuit GMSH<sup>2</sup>)
- > Lancer Mefissto pour plusieurs fréquences en parallèle
- > Lire les fichiers de résultats générés par Mefissto et les charger dans Scilab (ce qui permet ensuite de faire des calculs de post-traitement facilement)
- > Tracer des graphes (par exemple des fonctions de réponse dépendent de la fréquence ou des niveaux de bruit solidien)

---

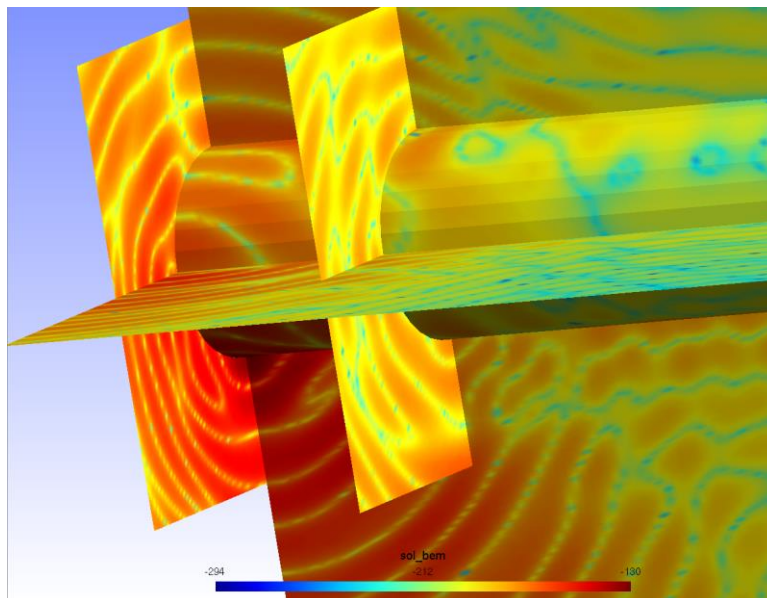
<sup>1</sup> <http://www.scilab.org/fr>

<sup>2</sup> <http://gmsh.info/>



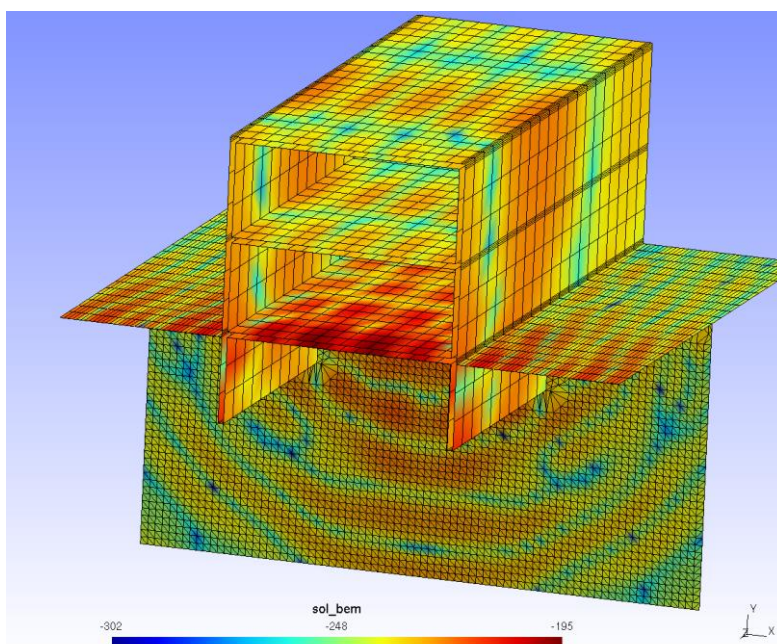
### Exemple 1 : tunnel dans un sol infini excité par une force ponctuelle

Dans cet exemple, on montre le niveau de déplacement vertical à 100 Hz sur le tunnel ainsi que dans différents plans de coupe. La visualisation est faite avec le logiciel GMSH.



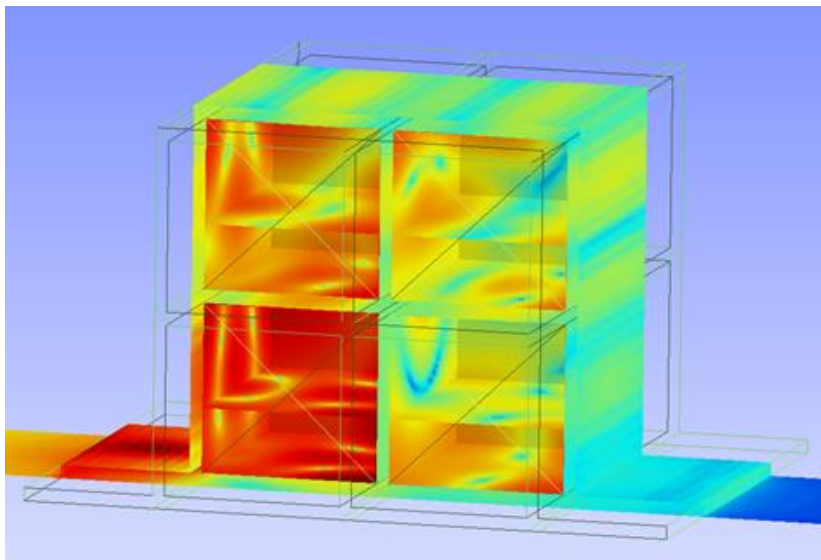
### Exemple 2 : vibrations d'un bâtiment par une excitation en surface

Un bâtiment de deux étages avec fondations verticales est excité au niveau du sol par une force verticale. On montre le déplacement vertical à 100 Hz sur la structure, au niveau du sol et dans un plan vertical à 10m de la source.



### Exemple 3 : champ acoustique rayonné par les parois (bruit solidien) dans un bâtiment

Un bâtiment de deux étages et de quatre locaux est soumis à une force verticale en surface. Le calcul du champ vibratoire est effectué en 2.5D, et le calcul du champ acoustique au sein des quatre locaux par une approche modale 3D (approche 2D3/4).



# MEFISSTO

Le logiciel dédié aux vibrations environnementales et à l'interaction sol-structure

## Pour plus d'informations

**Alexandre JOLIBOIS**

*Business developer*

*Direction Santé Confort*

Tél. : +33 1 64 68 88 28

Port. : +33 6 66 63 17 02

[alexandre.jolibois@cstb.fr](mailto:alexandre.jolibois@cstb.fr)

**CSTB**  
*le futur en construction*

**CSTB**

84 avenue Jean Jaurès

Champs-sur-Marne

77447 MARNE-LA-VALLÉE Cedex 2

FRANCE

[www.cstb.fr](http://www.cstb.fr)

[recherche.cstb.fr](http://recherche.cstb.fr) | [formations.cstb.fr](http://formations.cstb.fr) | [editions.cstb.fr](http://editions.cstb.fr) | [boutique.cstb.fr](http://boutique.cstb.fr)