

**EVALUATION DU RISQUE DE
DOMMAGE SUR LA STRUCTURE DE LA
RIGOLE ALIMENTAIRE LIE AUX
VIBRATIONS GENEREES PAR
L'EXPLOITATION DU TRAMWAY**

Demandeur de l'Etude :

M. Paul Martin

TRANSAMO

80 bd Dunois 1400 Caen

paul.martin@transamo.com

Auteur	Approbation	Vérification
Pierre ROPARS	Sébastien AGNOLIN	Ghislaine CAPOURET

SOMMAIRE

1 - OBJET D'ETUDE	3
2 - REFERENCES.....	3
3 - METHODOLOGIE	4
3.1 - METHODOLOGIE DE MODELISATION	4
3.2 - HYPOTHESES ET DONNEES D'ENTREE	4
4 - VALEURS SEUILS	7
5 - RESULTATS DE MODELISATION	7
6 - CONCLUSION.....	8

1 - OBJET D'ETUDE

TRANSAMO, mandataire de maîtrise d'ouvrage pour le compte de la communauté de commune de Caen-la-mer, a mandaté le CSTB pour la réalisation d'une estimation des niveaux vibratoires générés dans la structure de la rigole alimentaire en phase d'exploitation. Cette étude fait suite aux premières estimations sur l'impact de la rigole alimentaire sur la propagation des vibrations dans la zone de la rue de Bernière.

Le tracé du projet Tramway traverse le centre-ville de Caen, notamment le long du boulevard du Maréchal Leclerc. Dans cette section se trouve un ouvrage sous-terrain de faible profondeur dénommé Rigole Alimentaire. La section du projet concernée est découpée en 5 zones notées de A à E, dont notamment la partie centrale de la zone D sur laquelle le projet est directement au droit de l'ouvrage (voir figure ci-dessous).

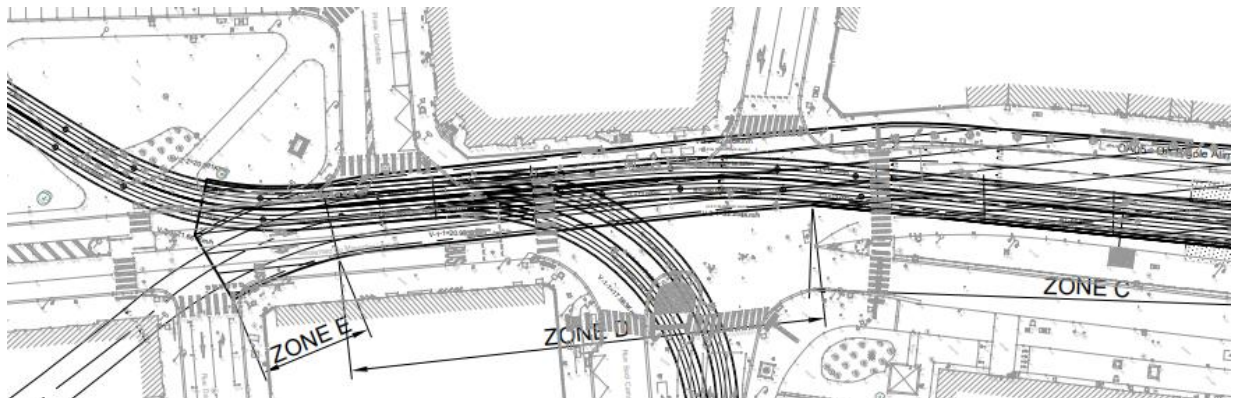


Figure 1 : Vue en plan du tracé et de la Rigole alimentaire, découpé en cinq zones selon leurs positions respectives, Extrait du carnet de coupes transversales (TRAME-O, T4210-AEO-AVP-TEO-RUB-000111-A_OA, 30/10/2023)

Lors de l'enquête publique des attentes ont émergés concernant l'étude du risque de dommage sur la structure de la Rigole alimentaire lié aux vibrations générées phase d'exploitation. Pour y répondre, ce document présente la méthodologie d'étude (incluant les hypothèses) et les données d'entrées utilisées. Les valeurs seuils, liées à la maîtrise du risque de dommages aux structures, sont présentées par la suite. Une dernière section présente les résultats de modélisation et statue sur le risque de dommage en lien avec les vibrations générées en phase d'exploitation. La conclusion du rapport rappelle les principaux résultats dont notamment la comparaison entre estimation et valeurs seuils.

2 - REFERENCES

[1] : MEFISSTO

[2] :

3 - METHODOLOGIE

L'étude se concentre sur l'estimation des niveaux vibratoires générés sur la structure de la rigole alimentaire lors d'un passage du tramway sur la voie en surface. Cette estimation est réalisée à l'aide de modélisations numériques réalisées par le biais du logiciel MEFISSTO [1]. Ces modélisations permettent de prendre en compte les propriétés linéiques de l'excitation (passage d'un tramway).

3.1 - Méthodologie de modélisation

Les modélisations s'appuient sur une approche couplée FEM-BEM avec une représentation 2.5D de la configuration. Cette représentation signifie que la géométrie est définie précisément dans le plan de coupe mais reste constante suivant l'axe de la Rigole alimentaire. La position des points d'excitation et d'observation de la vitesse vibratoire sont eux localisés dans l'espace 3D.

Ces modélisations permettent d'estimer directement la mobilité linéique entre une ligne de sources unitaires (segment représentant l'ensemble des points de contact Roues-Rails) et tous points du modèle. La mobilité linéique est alors couplée au spectre de densité de force pour donner les niveaux vibratoires sur la plage de fréquences choisie. Dans cette étude la plage de fréquences étudiée couvre toutes les bandes de tiers d'octaves entre 4 et 250 Hz.

La valeur retenue pour les comparaisons entre niveaux générés et valeurs seuils est une valeur globale du spectre de vitesse vibratoire (somme sur les tiers d'octaves). Cette valeur globale est ramenée à une valeur PPV par le biais d'un facteur de crête égale à 5.

Comme indiqué en section suivante, plusieurs hypothèses ont été formulées concernant les propriétés mécaniques de la Rigole alimentaire. La valeur retenue pour comparaison avec la valeur seuil est la valeur PPV la plus élevée obtenue pour toutes les hypothèses.

3.2 - Hypothèses et données d'entrée

Les hypothèses sont les suivantes :

Configuration

Les modélisations se concentrent sur la configuration la plus défavorable dans laquelle l'ouvrage de la Rigole alimentaire se situe à faible profondeur en dessous du tracé du projet. Dans cette configuration, une dalle de pontage est prévue afin de préserver l'ouvrage. Un schéma de la géométrie est donné ci-dessous.

COUPE TRANSVERSALE ZONE D

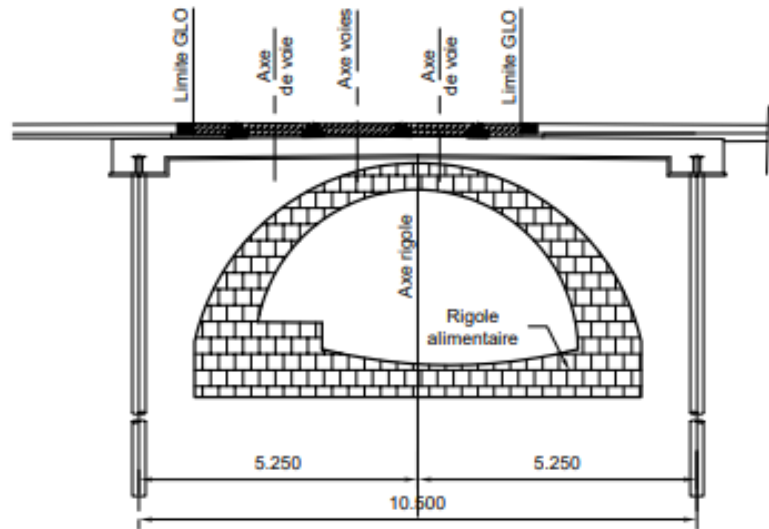


Figure 2 : Schéma de la configuration étudiée – Issu du carnet de coupes transversales (TRAME-O, T4210-AEO-AVP-TEO-RUB-000111-A_OA, 30/10/2023)

La géométrie précise de la configuration est donnée par les schémas des deux ouvrages ci-dessous (Rigole alimentaire et dalle de pontage). En synthèse ces caractéristiques sont :

- **Dalle de pontage :**
 - 35 cm d'épaisseur,
 - Béton précontraint au droit de la rigole alimentaire,
 - Béton armé à côté de la rigole alimentaire
 - Micropieux de 20 m de profondeur espacé de 1.5 m
- **Rigole alimentaire :**
 - Ouverture de 6 m,
 - Largeur hors tout de 8.50 m,
 - Hauteur d'environ 4.30 m,
 - Clé de voûte épaisseur 50 cm.

A noter, une faible épaisseur de polystyrène (ou de vide) est prévue entre la dalle de pontage et le sol. L'épaisseur de la couche de sol entre les deux ouvrages est inférieure à 10 cm.

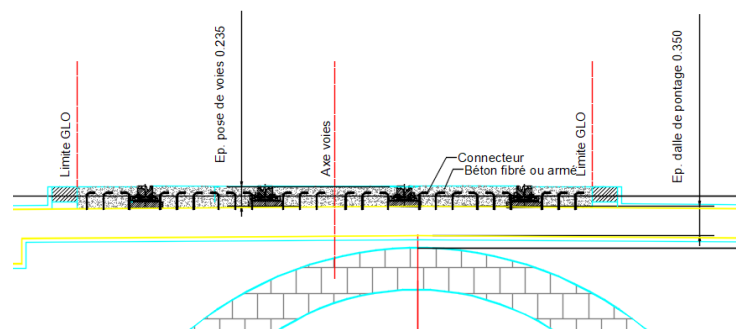
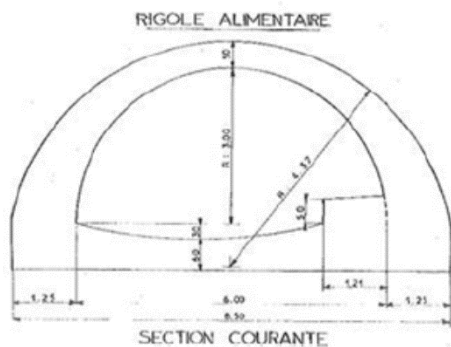


Figure 3 : Schéma de la rigole alimentaire (gauche) et de la dalle de pontage prévue au-dessus (droite).

Le sol environnant a été caractériser lors de l'étude géotechnique G1 AVP. En synthèse les propriétés mécaniques du sol retenues pour cette configuration sont retranscrites dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 : Caractéristiques élastiques retenues pour les couches du sol

Couche	Epaisseur	Young	Poisson	Dissipation	Masse vol.
Remblais	3.5 m	400 MPa	0.4	0.1	1800 kg/m ³
Alluvions	10.5 m	600 MPa	0.4	0.1	1800 kg/m ³
Marno-Calcaire	Inf.	800 MPa	0.4	0.1	1900 kg/m ³

De même, les propriétés élastiques retenues pour les différents matériaux de la dalle de pontage sont retranscrites dans ci-après.

Tableau 2 : Caractéristiques élastiques des bétons constituant la dalle de pontage

Matériaux	Module d'Young	Coefficient de Poisson	Coefficient de dissipation	Masse volumique
Béton armé	28 GPa	0.15	0.01	2400 kg/m ³
Béton précontraint	40 GPa	0.25	0.01	2500 kg/m ³

Excitation

L'excitation est caractérisée par les paramètres d'exploitation prévus sur le tronçon. Les paramètres retenus pour les modélisations sont :

- Vitesse de passage du tramway égale à 25 km/h ;
- Le pose de niveau est N2 ;
- Absence d'appareil de voie sur la zone ;
- Le niveau de rugosité des rails est modéré (voir [2])

Propriétés élastiques de la maçonnerie constituant la Rigole alimentaire

La plus grande inconnue de cette étude est portée par les propriétés élastiques de l'ouvrage en maçonnerie de la Rigole alimentaire. De plus, l'aspect « assemblée » de la maçonnerie n'est pas pris en compte, l'ouvrage est modélisé par un domaine uniforme. Afin de balayer les propriétés mécaniques possibles pour l'ouvrage, plusieurs jeux de paramètres ont été testées. Cette variation permet d'observer les résultats pour une structure allant de très souple (hypothèse 1) à résistante (hypothèse 3, assimilable à du béton armé). Ces jeux de paramètres sont présentés ci-après et les résultats finalement retenus en section 5 sont donnés pour le cas le plus défavorable (mesure conservative).

Tableau 3 : Caractéristiques élastiques de la Rigole

Maçonnerie	Module d'Young	Coefficient de Poisson	Coefficient de dissipation	Masse volumique
Hypothèse 1	3 GPa	0.15	0.01	2000 kg/m ³
Hypothèse 2	15 GPa	0.15	0.01	2000 kg/m ³
Hypothèse 3	30 GPa	0.15	0.01	2000 kg/m ³

4 - VALEURS SEUILS

La Circulaire du 23 juillet 1986 relative aux vibrations mécaniques émises dans l'environnement par les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) fixe des valeurs seuils en-dessous desquelles les risques de désordres structuraux sont considérés négligeables. Bien que très largement utilisée en France pour fixer les seuils vibratoires admissibles pour les dommages, ce texte n'est cependant pas applicable, stricto sensu, aux structures enterrées.

Le texte normatif le mieux adapté à l'ouvrage de la Rigole alimentaire est la norme britannique BS 5228-2:2009 (section B.4.4 « Underground services » [3]). En effet cette norme, indique des limites dédiées aux dommages de structure enterrées en maçonnerie. Ces limites sont :

- a) Un seuil de vitesse vibratoire PPV de 30 mm/s pour les excitations intermittentes ou transitoires ;
- b) Un seuil de vitesse vibratoire PPV de 15 mm/s pour les excitations continues.

Le spectre de l'excitation vibratoire étant relativement étendu (de l'énergie est générée sur une large plage de fréquence), le cas des vibrations continues est considéré. Pour rappel, les valeurs directement issues des modélisations (valeurs rms) sont traduites en PPV à l'aide d'un facteur de crête égale à 5.

La valeur seuil retenue en tous points de la Rigole alimentaire est de 15 mm/s (PPV).

5 - RESULTATS DE MODELISATION

Les modélisations ont permis d'estimer que le niveau vibratoire maximal généré dans la structure de la rigole alimentaire. Ces modélisations s'appuient sur un maillage de la géométrie dont la partie centrale est présentée sur la figure ci-dessous (le maillage complet est plus étendu afin de respecter les conditions de Sommerfeld). Les niveaux vibratoires

sont ainsi estimés en tout point de la géométrie. A titre d'illustration, une carte des déplacements suivant la direction verticale à 50 Hz est proposée ci-après.

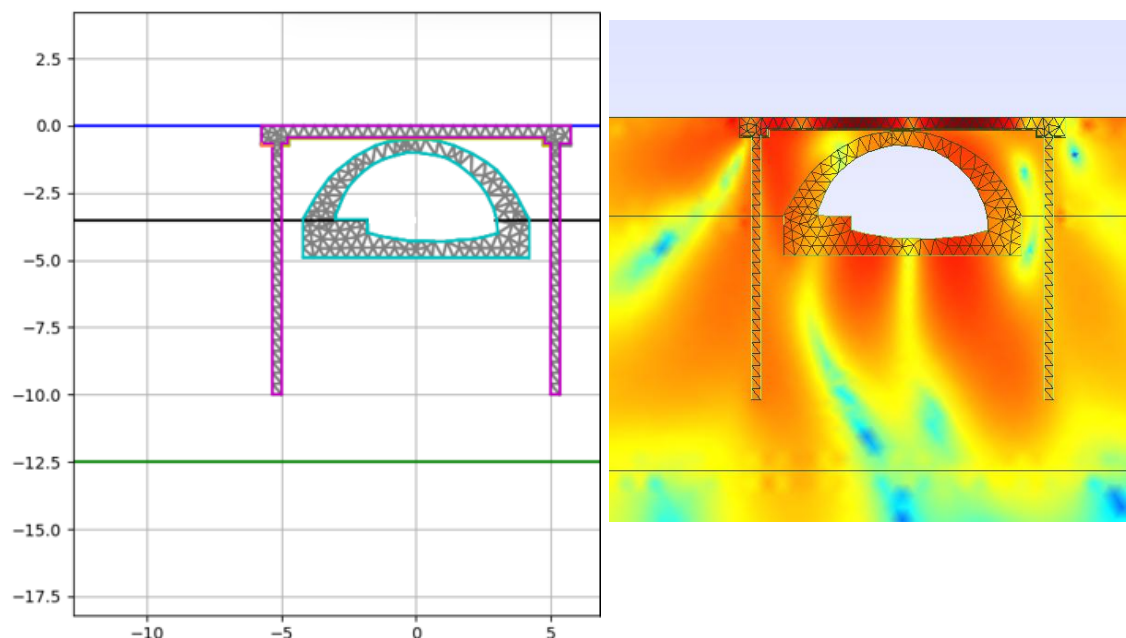


Figure 4 : Illustration des résultats de modélisations sur une partie du domaine, Gauche maillage, Droite déplacement verticale à 50 Hz.

Les niveaux vibratoires globaux (somme énergétique sur les plages de fréquences) sont estimés également en tout point de la structure. Le maximum ainsi observé est, en valeur PPV (facteur de crête de 5), égale à 4,4 mm/s.

D'après ces estimations, la vitesse vibratoire est inférieure à la valeur seuil retenue en section précédente (15 mm/s). Ainsi, le risque de dommage due aux vibrations générées par l'exploitation du tramway est jugé faible.

6 - CONCLUSION

Le présent document présente une étude des niveaux vibratoire générés dans la structure de la Rigole alimentaire lors du passage d'un tramway au droit de l'ouvrage. Cette étude s'appuie sur des modélisations numériques dédiées ainsi que sur la caractérisation du terme d'excitation mesuré en Phase 1 du projet. Les résultats indiquent que les niveaux vibratoires générés dans l'ouvrage sont inférieurs aux recommandations de la BS 5228-2 pour des structures de ce type. En conséquence, le risque de dommage sur la structure de la Rigole alimentaire lors de l'exploitation du projet est jugé faible.



Le futur en construction

Établissement public au service de l'innovation dans le bâtiment, le CSTB, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, exerce quatre activités clés : la recherche et expertise, l'évaluation, la certification et la diffusion des connaissances, organisées pour répondre aux enjeux de la transition énergétique dans le monde de la construction. Son champ de compétence couvre les produits de construction, les bâtiments et leur intégration dans les quartiers et les villes.

Avec plus de 900 collaborateurs, ses filiales et ses réseaux de partenaires nationaux, européens et internationaux, le groupe CSTB est au service de l'ensemble des parties prenantes de la construction pour faire progresser la qualité et la sécurité des bâtiments.