

Bonnes pratiques dans la prévision des impacts vibratoires d'un chantier de métro

Frédéric Delafosse

SOLDATA ACOUSTIC
66, boulevard Niels Bohr
CS 52132
69603 Villeurbanne CEDEX
E-mail : frederic.delafosse@soldata-acoustic.fr

Alexis Bigot

SOLDATA ACOUSTIC
Parc de l'île
21 Rue du Port
92020 NANTERRE CDX
E-mail : alexis.bigot@soldata-acoustic.fr

Jordan Minier

SOLDATA ACOUSTIC
New Loom House
101 Back Church Lane
LONDON E1 1LU - UK
E-mail : jordan.minier@soldata-acoustic.fr

Résumé

Les vibrations liées aux chantiers de métro sont susceptibles d'engendrer une gêne pour les riverains (via notamment le bruit solidien qui en résulte) mais présentent également un risque structurel pour les constructions, voire un risque de perturbation du fonctionnement des équipements dits sensibles. Pour toutes ces raisons, leur prévision et leur contrôle sont non seulement souhaitables mais également demandés par des maîtres d'ouvrage de plus en plus soucieux de préserver l'environnement et la santé au sens large.

Après un bref rappel des spécificités des méthodes de prévision des vibrations engendrées par un chantier de métro, deux cas concrets et d'actualité sont présentés, à la fois sur l'estimation des vibrations d'un tunnelier et sur le contrôle temps réel des impacts à proximité d'équipements sensibles.

Le contexte

Un chantier de métro est réalisé la plupart du temps en milieu urbain déjà construit avec un tracé complexe qui doit permettre aux futures rames de circuler rapidement (pentées et rayons de courbure à minimiser) tout en évitant les réseaux existants et les fondations diverses. A titre d'exemple, tout nouveau tunnel à construire sur le territoire de Hong Kong correspond à un vrai casse-tête chinois (Figure 1) et à l'inverse les nouveaux tracés au Qatar ou à Riyad n'ont pas ce genre de contraintes.

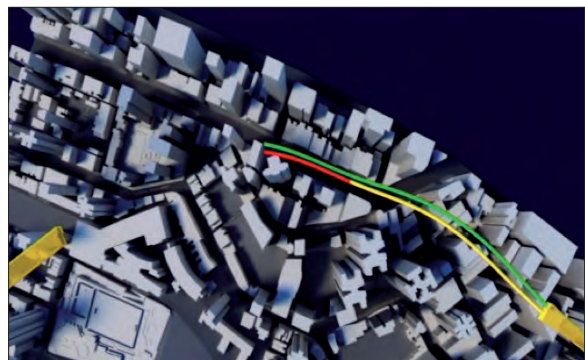


Fig. 1 : Densité des fondations sur le parcours d'un tunnelier à Hong Kong

Les approches prévisionnelles qui ont pour objectif d'évaluer un niveau de risque vibratoire lié à la construction d'un métro (tunnel) font généralement émerger les spécificités suivantes :

- A l'inverse d'un projet neuf pour lequel il faut dimensionner des dispositifs anti-vibratiles à mettre en œuvre sous un bâtiment connu puisque non encore construit, un tunnelier va irrémédiablement devoir évoluer dans une forêt de fondations existantes, sans bien sûr que l'on ait accès aux données de chaque immeuble, de chaque îlot. Il s'agit d'une des premières spécificités de ce type d'étude. Cette contrainte est cependant levée grâce à la réalisation d'études dites de vulnérabilité du bâtiment qui permettent, via un relevé *in situ* de toutes les anomalies, de dresser un état des lieux de la sensibilité aux vibrations des avoisinants, bien utile à l'ingénieur qui va chercher à identifier le long du tracé, les zones *a priori* les plus sensibles.
- La connaissance de la source et de ses caractéristiques vibratoires constitue le second obstacle de taille propre à ce type d'études. Un tunnelier est le plus souvent unique et il sera donc nécessaire, si l'on veut connaître avec plus de précision le niveau de risque vibratoire, de procéder, une fois le tunnelier en place, à des campagnes de mesures de décroissance qui permettront de mieux connaître la source, et accessoirement les caractéristiques du sol.

Des conditions de ces mesures (durée, instrumentation en surface et/ou dans des forages) dépendront bien évidemment la précision des données recueillies...et l'on comprend bien que l'entreprise en charge du creusement du tunnel ne mette pas forcément en priorité n°1 le fait de permettre la réalisation de telles investigations.

- Connaître le sol et ses anomalies constitue un autre obstacle, que les différents sondages, par nature ponctuels, n'arrivent que partiellement à franchir. La pré-identification de zones *a priori* sensibles peut là-aussi être nécessaire afin de prioriser les zones à sonder, pour lesquelles on cherchera, par exemple, à obtenir des données de type module d'Young dynamique.
- La source, le sol, et le type de fondations étant connus, il est alors possible de réaliser un calcul de propagation depuis le tunnelier jusqu'à l'intérieur des habitations sensibles, afin d'évaluer le risque de dépassement des seuils vibratoires (intégrité des bâtiments et/ou fonctionnement d'équipements sensibles) et acoustiques (bruit soldien rayonné). Méthodes analytiques, méthodes par éléments finis et/ou éléments de frontières...le panel *a priori* à la disposition de l'expert est large mais leur utilisation reste complexe, et nécessite à la fois des compétences en calculs numériques, en acoustique et vibrations, voire en géotechnique et structures.
- Enfin, puisque bien malin sera celui qui peut prédire avec certitudes et suffisamment de précisions l'ensemble des niveaux vibratoires sur tout le tracé du tunnelier, la définition et la mise en place d'un système dit de monitoring est aujourd'hui indispensable. Le design du système de monitoring devra là encore répondre aux véritables enjeux et être définis en concertation avec les différentes parties prenantes : quels seuils, comment, à quelle fréquence, pour communiquer quoi et à qui ? Autant de questions qui méritent d'être posées le plus en amont possible et en lien avec les résultats des études prévisionnelles, pour éviter les mauvaises surprises mais également la sous-estimation ou la sur estimation de ces dispositifs.

Dans la suite de cet article, on se propose d'illustrer concrètement deux cas d'études portant sur des volets *a priori* opposés et pourtant complémentaires, comme on vient de le voir :

- La caractérisation d'un tunnelier au lancement d'un chantier de métro et les modélisations correspondantes, en France.
- La mise en œuvre d'un système de monitoring dédié à la surveillance d'équipements sensibles lors d'un autre chantier de métro, en Angleterre.

On notera que pour ces deux exemples, les méthodologies utilisées sont largement inspirées de ce qui se pratique déjà dans les pays à culture anglo-saxonne dans des zones particulièrement sensibles (Londres et Hong Kong notamment). L'objectif est ainsi de montrer que ces méthodologies sont aisément transposables à nos projets français, à partir du moment où la volonté (et donc les budgets associés) est là !

Cas 1 : Prévisions des vibrations engendrées par un tunnelier

Les phénomènes en jeu

Il s'agit, dans ce premier cas d'étude, de préciser les méthodologies de prévisions des vibrations engendrées par le creusement au tunnelier de la ligne B du métro de Rennes, pour laquelle Soldata Acoustic a été missionnée par le groupement d'entreprise Dodin Campenon Bernard / Spie-Batignolles TPCI / GTM Ouest / Legendre Ouest / Botte fondations et Spie Batignolles fondations. La machine ELAINE va ainsi creuser 8 kms de tunnel, sur un diamètre de près de 10 m, avec une vitesse d'avancement de 2 m/heure.

L'objectif est clairement d'identifier le risque vibratoire de façon fiable le plus en amont possible : la recherche d'un compromis entre données d'entrée pertinentes (et donc ne pouvant être obtenues que lors du début des travaux) et marge de manœuvre temporelle pour réagir constitue vraiment un des enjeux forts de cette étude encore en cours.

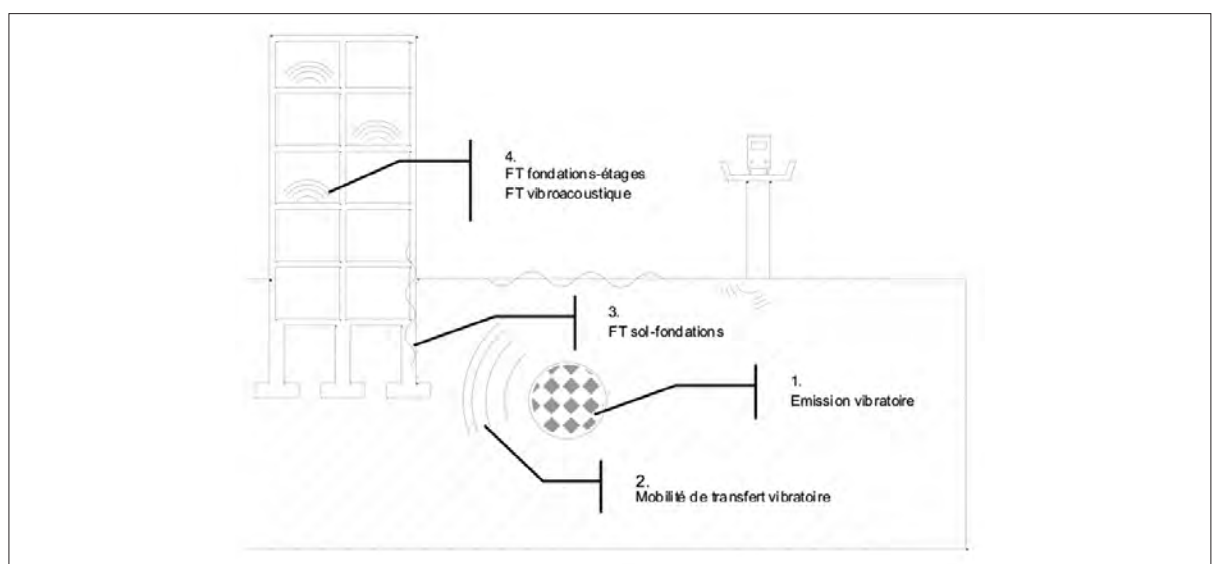


Fig. 2 : Phénomènes de propagations en jeu

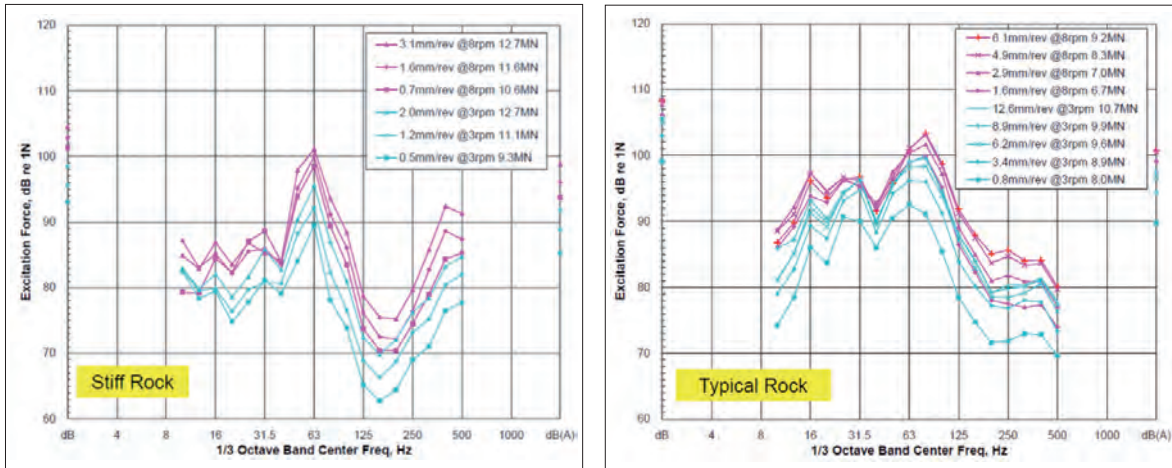


Fig.3 : Spectres vibratoires types de tunnelier pour différentes vitesses de rotation, forces de poussée et types de roches. Source [1]

Comme vu précédemment, la prévision des vibrations engendrées par les travaux de creusement du tunnel au tunnelier nécessite la connaissance des données suivantes :

- L'émission vibratoire du tunnelier. Les vibrations émises dans le sol dépendront du type de tunnelier, mais également du type de sol ainsi que du mode de pilotage de l'appareil. Dans le cas de la ligne B du métro de Rennes, le tunnelier utilisé est de type EPB (Earth Pressure Balance). On peut considérer que pour ce type de tunnelier, lorsqu'il opère en terrain dur, la vibration émise dans le sol correspond aux vibrations induites par les molettes. La donnée d'entrée du modèle aux éléments finis est exprimée en termes de force vibratoire. Celle-ci n'étant pas connue à ce stade, des hypothèses ont dû être réalisées.
- La fonction de transfert (dite également «mobilité de transfert») correspondant à la propagation des vibrations dans le sol jusqu'au niveau des fondations des bâtiments. Cette fonction de transfert dépend des caractéristiques des différents couches géologiques du sol.
- La fonction de transfert entre le sol et les fondations du bâtiment.
- La fonction de transfert entre les fondations du bâtiment et les pièces des logements concernés. Si l'on veut évaluer le bruit solidien perçu par les occupants, il est nécessaire de connaître également la fonction de transfert vibro-acoustique entre la vibration dans le logement et le bruit solidien.

L'approche retenue

La méthodologie retenue pour l'évaluation des vibrations liées au tunnelier est basée selon une méthodologie décomposée en 3 phases, qui permettent d'adapter le niveau de détail des calculs en fonction des enjeux.

- En phase de préparation des travaux, une étude préalable est réalisée sur la base d'une hypothèse concernant la force vibratoire du tunnelier. L'estimation de la propagation dans le sol est réalisée sur la base de simulations numériques. Des spectres d'émission vibratoire typiques de tunnelier sont montrés en Figure 3 sur laquelle on voit clairement l'influence du mode de fonctionnement du tunnelier (taux de pénétration, force de poussée) sur la force vibratoire.

- Au démarrage des travaux de creusement du tunnel, des essais vibratoires sont réalisés sur un terrain propice (ex : terrain dégagé avant que le tunnelier n'arrive dans les zones d'habitation dense), afin de mesurer la vitesse vibratoire au niveau de la surface du sol lorsque le tunnelier passe dans le sous-sol. Le site d'essai doit ensuite être modélisé afin d'évaluer la mobilité de transfert et ainsi de caractériser indirectement l'émission vibratoire. La mobilité de transfert peut également être évaluée à l'aide de mesures. Cette méthodologie est proposée par [1] et est illustrée en Figure 4.

La formule de calcul est la suivante :

$$EFL = \text{Vibration Level} - \text{PSR}$$

Avec : EFL (Excitation Force Level): force d'excitation du tunnelier en dB (ref. 1N) et 1/3 octave.

Vibration Level : Vitesse vibratoire en dB (ref. 5.10-8 m/s) et 1/3 d'octave, à la surface du sol.

PSR (Point Source Response) : Mobilité de transfert mesurée ou calculée depuis l'axe du tunnel.

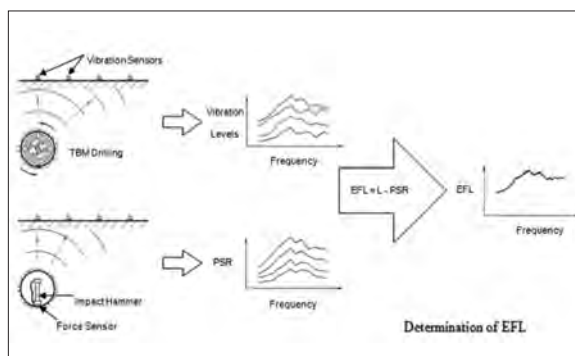


Fig. 4 : Méthode de mesure pour détermination de la force du tunnelier (EFL) – Source [1]

- La force du tunnelier issue des essais vibratoires permet d'améliorer la précision de l'étude vibratoire préalable. Cette force est en théorie indépendante de la structure géologique du sol d'essai et est ensuite utilisée pour réaliser une étude prévisionnelle détaillée dans les bâtiments sensibles situés le long du tracé. Cette étude détaillée peut également nécessiter de mesurer les fonctions de transfert des bâtiments étudiés.

Les résultats

Les résultats détaillés des mesures et modélisations ne sont pas présentés ici pour d'une part des raisons de confidentialité mais surtout du fait que les études sont encore en cours.

On retiendra néanmoins que :

- L'avantage de cette approche, basée sur une combinaison mesures/calculs, est de pouvoir affiner la précision des résultats au fur et à mesure de l'avancement du projet, à l'aide d'essais vibratoires. Le groupement d'entreprises a choisi ici d'adopter une approche volontaire de management des impacts vibratoires, basée sur une anticipation des nuisances potentielles liées aux vibrations. Cette approche déjà pratiquée dans les pays anglo-saxons est innovante en France. Elle devrait se généraliser dans l'avenir, compte tenu de la sensibilité des riverains, maîtres d'ouvrages, maîtres d'œuvres et entreprises sur les risques de nuisances vibratoires liés aux chantiers urbains en général.
- Les difficultés rencontrées résident essentiellement dans la fiabilité des données d'entrée. C'est pour cette raison que des études dites « à tiroir » sont nécessaires, via la mise en place d'une approche itérative avec nécessité de réaliser des essais vibratoires pour affiner les données d'entrée.
- Les voies de progrès envisageables sont de permettre une évaluation globale des vibrations à grande échelle (sur un grand nombre de bâtiments, et non de façon ponctuelle sur quelques bâtiments). Cette approche permettrait aux entreprises d'adopter des mesures concrètes de réduction des vibrations, comme par exemple adapter le mode de pilotage du tunnelier à l'approche des zones sensibles, en s'appuyant sur le système de monitoring vibratoire mis en place.

Cas 2 : surveillance temps réel des vibrations à proximité d'équipements sensibles

Les phénomènes en jeu

On se propose ici de détailler les méthodologies de contrôle des vibrations engendrées par la création d'une jonction entre la nouvelle station Crossrail et la station London Underground située à l'intersection des lignes Jubilee et Central, en plein cœur de Londres (UK).

L'objectif est notamment de s'assurer de la non-perturbation, par les activités de creusement du tunnel et de démolitions adjacentes, du fonctionnement d'équipements sensibles (radio, gestions des équipements de signalisation, signaux de sécurité...) internes à la station même. Les enjeux dépassent en effet ceux d'une problématique de gêne voire de structure puisqu'un endommagement des équipements sensibles aurait pour impact une perturbation évidente du bon fonctionnement du métro.

La prestation de monitoring, actuellement en cours, comprend la surveillance des vibrations via l'utilisation de géophones mais aussi d'accéléromètres, tous reliés à un système d'analyseur fréquentiel, avec visualisation des résultats en temps réel via l'interface Geoscope (plateforme de data management), qui a fait l'objet de développements spécifiques pour l'occasion.

L'approche retenue

La première difficulté de ce projet est venue de la définition même des seuils de vibrations à retenir. Installés dans une station de plus de 120 ans, les équipements en place sont pour la plupart très anciens mais également redondants et il a été extrêmement difficile d'obtenir des informations de la part des fabricants sur les niveaux vibratoires admissibles pour ces matériels. De plus, les principales normes britanniques relatives aux vibrations dans les bâtiments [2] et [3] ne traitent pas de cette problématique.

In fine, et compte-tenu de la présence de deux « switch room » comprenant des tableaux, armoires électriques, et consoles de signalisation, nous avons choisi, en concertation avec la maîtrise d'ouvrage Crossrail, de définir les seuils de vibrations sur la base de la norme européennes [4] qui fixe des limites en accélérations de l'ordre de 5 m/s^2 sur la plage de fréquence de 9 Hz à 200 Hz.

Monitoring et résultats

Les équipements sensibles sont instrumentés via la pose d'accéléromètres mono-axes (ICP 601A02 sensibilité 0.5V/g) reliés en filaire à un analyseur temps réel multi voies. Par opposition aux solutions plus systématiques et classiques de type géophone fixés au sol, ces accéléromètres, de faible taille et poids, sont fixés directement sur chaque équipement sensible. Ils permettent ainsi de mesurer avec précision les niveaux vibratoires auxquels sont soumis les équipements et leurs supports.



Fig. 5 : Exemple d'équipements sensibles présents dans les switch rooms



Fig. 6 : Exemple de montages des accéléromètres sur les équipements sensibles

Les données sont ensuite traitées par FFT afin de comparer les valeurs mesurées aux seuils exprimés en mm/s^2 .

Afin d'éviter le traitement de toutes les données, seules les accélérations moyennes de 5 à 200 Hz sont stockées. L'information fournie permet d'identifier et de comparer les événements vibratoires aux différentes phases de démolitions.

Un des principes même du monitoring étant d'objectiver et de faciliter la communication, les alarmes reçues font bien sûr l'objet d'analyses et d'échanges entre la personne en charge de l'ensemble de la surveillance (surveillance structurelle et environnementale) et les responsables du projet. Des adaptations du process sont alors possibles.

Au-delà des études nécessaires au design même du système de monitoring, la mise en œuvre sur le terrain d'un tel dispositif constitue en elle-même un défi de taille dans un métro, qui plus est londonien :

- Prise en compte de l'ensemble des contraintes QSE imposés par le gestionnaire London Underground (habilitations du personnel, etc.).

- Validation via PV des classements feu des câbles de connexion aux accéléromètres, des installations électriques et des emplacements de tout le matériel de monitoring.
- Interventions de nuit limitées à quelques heures avec obligation de libérer la station à 4h du matin pour permettre son accès aux 150 000 passagers quotidiens ... sous risque de pénalités très lourdes en cas de retard de plus de 10 minutes !

Les résultats

Les résultats détaillés des mesures lors des différentes phases de travaux ne sont pas présentés pour des raisons de confidentialité.

Les graphes ci-dessous (Figure 7) présentent néanmoins des résultats de niveaux de bruit de fond, hors périodes de travaux, qui permettent de repérer non seulement les passages de train mais aussi les phases de mise en route des équipements de ventilation présents dans les armoires électriques des switch room.

Encore une fois, la pertinence d'une démarche de monitoring réside bien évidemment dans les choix métrologiques mais aussi et surtout dans l'analyse des données, leur communication et leur exploitation à bon escient. Dans cet exemple, et compte-tenu des enjeux, une analyse systématique de corrélation entre événements mesurés et activités de démolition est réalisée, via des réunions d'échanges entre le consultant et l'équipe du chantier. Sans cela, le système de monitoring est vite ignoré et son utilisation limitée aux constats de dépassements de seuil, en laissant de côté tout le volet préventif.

Synthèse

Les enjeux relatifs aux vibrations liées aux chantiers de métro ne sont plus à démontrer ; que ce soit en phase amont ou en phase de contrôle, les méthodologies à mettre en place restent complexes et surtout « sur-mesure ». En effet, il est indispensable d'adapter aussi bien les méthodes de modélisations aux données disponibles que les méthodes de monitoring aux contraintes et réalités du terrain.

Les expériences anglo-saxonnes à l'origine des deux méthodes présentées ici, montrent que malgré ces difficultés, il est possible d'anticiper les impacts vibratoires de tels projets.

C'est finalement via une vision globale de la phase projet à la phase travaux voire exploitation que l'acousticien

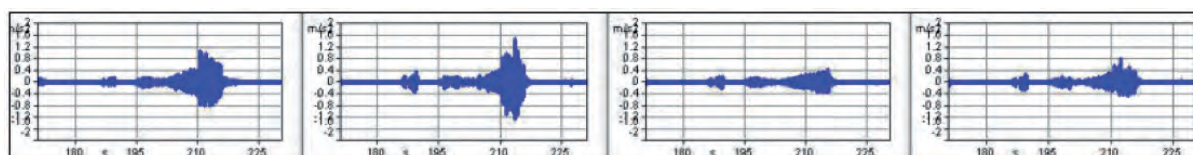


Fig. 7 : Accélérations mesurées aux passages des trains sur les quais de la station

peut et doit développer ses compétences et retours d'expériences, afin d'affiner ses méthodes d'évaluation de risque. Des travaux spécifiques (développement et validation des méthodes de prévisions, ou encore plus d'interaction entre le terrain et le bureau) sont souhaitables pour pouvoir fournir aux différentes parties prenantes un conseil pertinent.

Références bibliographiques

- [1] Méthode de mesures pour détermination de la force du tunnelier (EFL) – Source : Wilson HO, Alan Crockett et Andy Raine, Measurement and prediction of groundborne noise from a tunnel boring machine, Technical Acoustics 2006 – 2009
- [2] BS7358 : Evaluation and measurement for vibration in buildings : Guide for measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings.
- [3] BS 6472 : Evaluation of Human Exposure to Vibration in Buildings (1Hz to 80Hz)
- [4] ETSI EN 300 019-1-8 V2.1.4 (2003-04) : Environmental Engineering (EE); Environmental conditions and environmental tests for telecommunications equipment; Part 1-8: Classification of environmental conditions; Stationary use at underground location

ERRATUM

Une erreur de transcription s'est glissée dans l'article suivant paru dans le numéro 78, entraînant une mauvaise attribution des rôles dans la réalisation du Dôme de la Comédie Française. Rendons à chacun ce qui lui revient ... et avec les excuses de la rédaction

Le dôme de la salle Richelieu de la Comédie Française fait peau neuve

Construit au XVIII^e siècle par l'architecte Victor Louis, la salle Richelieu située place Colette à Paris, a connu de nombreuses transformations qui ont peu à peu détérioré ses qualités acoustiques.

C'est le cabinet Brossy & Associés Architectes qui a été chargé de la modernisation et de la rénovation du prestigieux dôme situé au-dessus du théâtre. Il a choisi pour cela de réduire la surface allouée aux équipements techniques (HVAC), afin de mettre en valeur la structure en fer forgée imaginée par Julien Gadet en 1900 et récupérer une partie du volume pour créer un nouvel espace totalement indépendant de la salle de spectacle.



Le dôme de la salle Richelieu recouvert de MonoAcoustic. ©Studio Barthélémy

Pour exploiter au mieux cette salle, l'acousticien Jean-Paul Lamoureux a choisi d'intégrer dans la structure métallique du dôme, un système de plafond Mono Acoustic de Rockfon qui épouse toutes les courbes mariant ainsi l'esthétique aux performances.

Après plus d'un an de travaux, le dôme est ainsi devenu un espace indépendant, fonctionnel et élégant, totalement isolé acoustiquement de la salle de théâtre située en dessous.

Maître d'ouvrage : Comédie Française
ACMH : AC PERROT
Architectes : Brossy & Associés
Acousticien : Jean-Paul Lamoureux
Économiste de la construction : Ph. Votruba
BET Fluides : MS Consulting
BET Structures : KHEPHREN

Pour plus d'informations : <http://www.rockfon.fr>