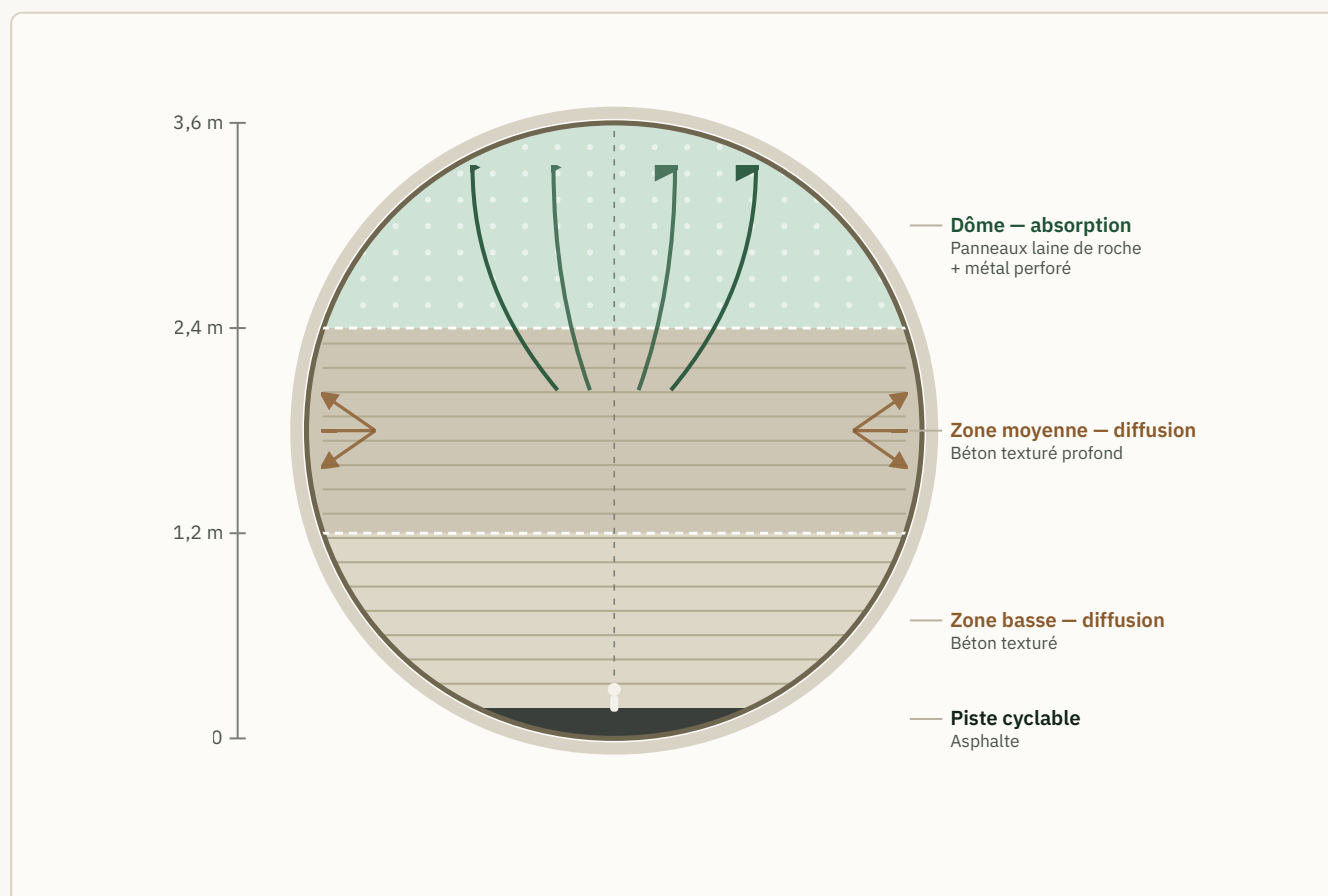


TECHNOLOGIE · MISE EN ŒUVRE · COÛTS

L'acoustique du tunnel cyclable

Comment transformer un tube de béton de 150 km en un espace au confort sonore maîtrisé — passer d'une réverbération de 6 à 8 secondes à moins de 2 secondes.



1 Résumé exécutif

Un tunnel de béton nu se comporte comme une cathédrale : le son y rebondit pendant six à huit secondes. Deux technologies combinées, appliquées en continu sur les 150 km, ramènent cette réverbération sous les deux secondes — l'ambiance feutrée d'une bibliothèque — pour environ 450 M\$, soit 3 M\$ par kilomètre.

RÉVERBÉRATION

6–8 s → < 2 s

de «cathédrale» à «bibliothèque»

COÛT SUR 150 KM

≈ **450 M\$**

3,0 M\$/km · ~5 % du projet

MATÉRIAUX

100% incombustible

béton · laine de roche · métal

Le défi acoustique d'un tunnel cyclable n'est pas un détail de confort : un écho prolongé fatigue, masque les annonces de sécurité, rend toute conversation pénible et amplifie le bruit de la ventilation jusqu'à l'inconfort. La solution repose sur deux couches complémentaires. D'abord, un **béton texturé** qui disperse le son au lieu de le renvoyer comme un miroir — c'est la *diffusion*. Ensuite, des **panneaux de laine de roche recouverts de métal perforé**, installés sur le dôme, qui capturent l'énergie sonore résiduelle comme une éponge — c'est l'*absorption*.

Ce document explique la technologie, la manière de l'appliquer sur 150 km, le calcul physique qui mène à une réverbération inférieure à deux secondes, et la ventilation détaillée des coûts. Il montre aussi pourquoi ce poste est doublement rentable : les mêmes matériaux qui tuent l'écho rendent la ventilation mécanique supportable et constituent une doublure entièrement incombustible — un seul investissement, trois problèmes réglés.

2 Le problème : pourquoi un tunnel résonne

Le son est une onde de pression qui voyage dans l'air et rebondit sur les surfaces dures. Dans une pièce ordinaire — meublée, avec tapis, rideaux et gens — cette énergie est rapidement absorbée. Un tunnel de béton est l'inverse exact : des parois lisses, denses et parallèles qui renvoient presque toute l'énergie reçue. Le son tourne en rond, encore et encore, avant de s'éteindre.

Deux phénomènes en découlent. Le premier est la **réverbération** : une longue traîne sonore qui brouille tout, comme dans une église ou un stationnement souterrain. Le second est l'**écho battant** (ou «flutter») : entre deux surfaces parallèles, le son fait des allers-retours réguliers qui produisent ce timbre métallique caractéristique du « mégaphone ». Un simple coup de sonnette devient agressif ; une voix portée à dix mètres revient en bouillie.

Pour un réseau parcouru chaque jour par des dizaines de milliers de cyclistes, c'est inacceptable. Un environnement sonore maîtrisé n'est donc pas un luxe : c'est une condition de confort, de sécurité (entendre une annonce, un autre usager, un véhicule de service) et d'acceptabilité du projet. L'objectif technique se chiffre : ramener le **temps de réverbération sous deux secondes**, valeur reconnue pour qu'un grand volume reste intelligible et agréable.

3 La solution : deux couches complémentaires

La stratégie ne mise pas sur un seul matériau miracle, mais sur la complémentarité de deux mécanismes physiques distincts : disperser ce qui peut l'être, absorber le reste.

3.1 — La diffusion : le béton texturé

Plutôt que de couler des anneaux lisses, on moule le revêtement avec des motifs en relief — rainures, vagues, facettes. Une surface plane renvoie le son dans une seule direction, comme un miroir renvoie la lumière ; une surface texturée l'éparpille dans toutes les directions. On ne *supprime* pas l'énergie, on la *redistribue* dans le temps et l'espace. Résultat immédiat : l'écho battant disparaît et la dureté du timbre s'adoucit. La diffusion seule ne suffit pas à raccourcir beaucoup la traîne sonore — elle prépare le terrain pour l'absorption.

3.2 – L'absorption: panneaux laine de roche + métal perforé

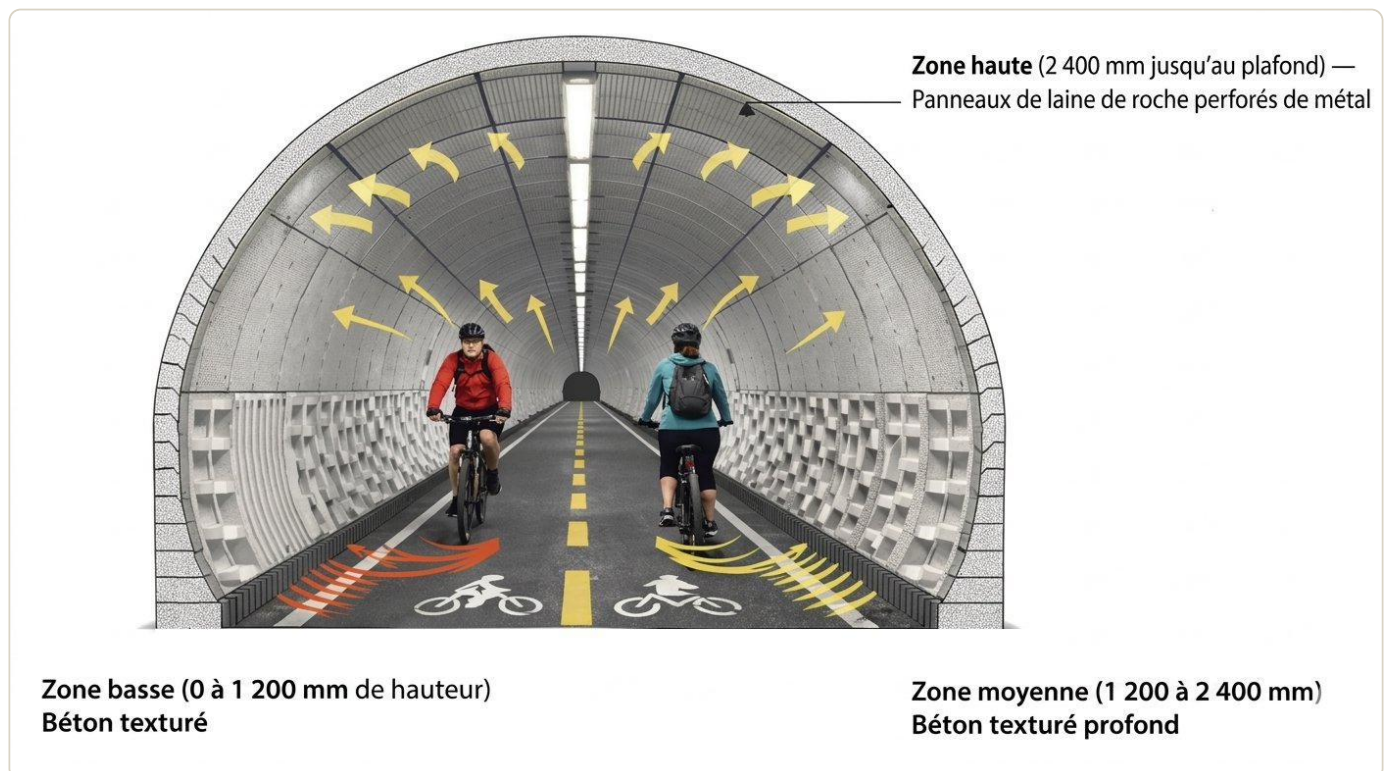
Sur la partie haute du tunnel, là où le son se concentre, on installe des panneaux absorbants. Leur construction est précise: une épaisse couche de **laine de roche** (le matériau absorbant), montée avec une lame d'air derrière une plaque de **métal perforé**. Le métal protège la laine, se nettoie facilement et résiste au feu, tout en étant «transparent» au son grâce à ses perforations: l'onde le traverse et vient mourir dans la laine. La profondeur de l'assemblage (épaisseur de laine + lame d'air) règle la capacité à absorber les sons graves – les plus difficiles à dompter.

3.3 – Les trois zones

Le traitement varie selon la hauteur, parce que toutes les surfaces ne jouent pas le même rôle acoustique. La zone basse et la zone moyenne, à hauteur d'oreille et de guidon, reçoivent un béton texturé de plus en plus profond; le dôme, où l'énergie s'accumule, reçoit les panneaux absorbants.

LES TROIS ZONES DE TRAITEMENT ACOUSTIQUE

Zone	Hauteur	Traitement	Rôle
Zone basse	0 – 1 200 mm	Béton texturé	Diffusion à hauteur de roue
Zone moyenne	1 200 – 2 400 mm	Béton texturé profond	Diffusion à hauteur d'oreille
Dôme (zone haute)	2 400 mm → plafond	Panneaux laine de roche + métal perforé	Absorption de l'énergie résiduelle
Plancher	—	Asphalte de la piste	Aucun (surface roulante)



Rendu réaliste de la coupe. Zone basse: béton texturé. Zone moyenne: béton texturé profond. Zone haute (dôme): panneaux de laine de roche recouverts de métal perforé. Les flèches illustrent l'onde sonore dispersée par les parois et absorbée par le dôme.

4 La science: comment on atteint moins de 2 secondes

La performance acoustique d'un grand volume se mesure par son **temps de réverbération**, noté TR_{60} : c'est le temps que met un son pour décroître de 60 décibels, c'est-à-dire pour devenir mille fois plus faible – en pratique, le temps qu'il « met à mourir ». Plus il est court, plus l'espace est intelligible.

4.1 – L'équation de Sabine

Le calcul de référence est l'équation de Sabine, qui relie le temps de réverbération au volume de l'espace et à sa capacité totale d'absorption :

$$TR_{60} = 0,161 \times \frac{V}{A}$$

où **V** est le volume (en m^3) et **A** l'absorption totale (en m^2 sabins). Cette absorption A se calcule en additionnant, pour chaque surface, son aire multipliée par son **coefficient d'absorption α** – un nombre entre 0 (renvoie tout, miroir parfait) et 1 (absorbe tout, fenêtre ouverte). Le béton lisse a un α d'environ 0,02 ; une bonne laine de roche dépasse 0,85.

4.2 – Le tunnel nu: le calcul

Raisonnons sur un mètre de tunnel, qui se répète identique sur toute la longueur. La géométrie est fixée par le diamètre intérieur de 3,6 m.

GÉOMÉTRIE DU TUNNEL (PAR MÈTRE LINÉAIRE)

Grandeur	Valeur
Diamètre intérieur	3,6 m
Rayon	1,8 m
Périmètre intérieur	11,3 m
Section transversale	10,2 m^2
Volume par mètre (V)	10,2 m^3

On répartit ensuite les surfaces selon les trois zones et on leur attribue leur coefficient d'absorption, d'abord à l'état nu (tout en béton lisse), puis à l'état traité.

SURFACES ET COEFFICIENTS D'ABSORPTION (À 500 HZ)

Surface	Aire (m^2/m)	α nu	α traité
Plancher (asphalte)	3,0	0,03	0,03
Parois basse + moyenne (béton texturé)	3,3	0,02	0,07
Dôme (panneaux absorbants)	4,4	0,02	0,85
Total	10,7	–	–

À l'état nu, l'absorption totale par mètre vaut $A = (3,0 \times 0,03) + (7,7 \times 0,02) \approx$ **0,24 sabin**. En appliquant Sabine :

$$TR_{60} = 0,161 \times \frac{10,2}{0,24} \approx 6,7 \text{ s}$$

On retrouve exactement l'ordre de grandeur annoncé: **6 à 8 secondes**. Un tunnel de béton brut est bel et bien une cathédrale sonore.

4.3 – Le tunnel traité: le calcul

Avec le traitement, l'absorption du dôme bondit. $A = (3,0 \times 0,03) + (3,3 \times 0,07) + (4,4 \times 0,85) \approx 4,06$ sabins – près de dix-sept fois plus. Le même calcul donne alors :

$$TR_{60} = 0,161 \times \frac{10,2}{4,06} \approx 0,40 \text{ s}$$

TEMPS DE RÉVERBÉRATION CALCULÉ (SABINE)

Scénario	A (sabins/m)	TR ₆₀	Ambiance
Tunnel nu (béton lisse)	0,24	6,7 s	Cathédrale – effet mégaphone
Tunnel traité (dôme couvert)	4,06	0,40 s	Théorique – très sourd
Cible de conception retenue	0,82	< 2 s	Bibliothèque – confortable

4.4 – Pourquoi viser moins de 2 secondes, et non 0,4 seconde

Le calcul de Sabine donne 0,4 seconde – bien *en deçà* de la cible. Deux raisons expliquent qu'on retienne pourtant un objectif plus prudent, « moins de 2 secondes », et c'est là que se trouve la vraie ingénierie.

Un tunnel n'est pas une pièce. L'équation de Sabine suppose un « champ diffus »: un son qui rebondit également dans toutes les directions d'un volume compact. Or un tube de 150 km est l'exact opposé – une géométrie extrêmement allongée. Le son lancé dans l'axe du tunnel parcourt de longues distances avant de rencontrer les parois absorbantes; sa décroissance *le long* du tube est donc plus lente que ne le prédit la théorie des pièces. La réverbération réellement perçue par un cycliste est plus longue que les 0,4 s idéalisés. Les deux effets – une forte absorption qui tire vers le bas, une géométrie allongée qui pousse vers le haut – se rencontrent dans une zone confortable, sous deux secondes.

On ne veut pas d'un tunnel « mort ». Un espace trop absorbant sonne étouffé, oppressant, contre-nature. Une légère vivacité est agréable – et moins coûteuse. La cible de deux secondes laisse une marge délibérée. Pour donner une idée: si le tunnel se comportait comme une pièce ordinaire, il suffirait de couvrir **environ 13 % du dôme** de panneaux performants pour atteindre deux secondes. On en spécifie bien davantage – une couverture quasi continue – non par excès, mais précisément parce qu'un tube de 150 km *n'est pas* une pièce ordinaire: sa dimension axiale exige une absorption continue, et cette continuité offre en prime une marge de sécurité considérable.

4.5 – La question des fréquences graves

Tous les sons ne s'absorbent pas aussi facilement. Les aigus sont faciles; les **graves** – le grondement de fond – sont les plus tenaces, parce que leurs ondes sont longues. C'est précisément le rôle de la lame d'air derrière le métal perforé: augmenter l'épaisseur effective de l'assemblage repousse l'absorption vers le bas du spectre. Le dimensionnement final consiste à ajuster épaisseur de laine et profondeur de lame d'air pour couvrir toute la plage utile, des graves de la ventilation aux aigus des sonnettes.

Portée de ce calcul. Les valeurs ci-dessus sont des estimations de conception préliminaire, destinées à démontrer la faisabilité et l'ordre de grandeur. Un projet réel exige une modélisation acoustique fine (lancer de rayons, éléments finis), des prototypes grandeur nature et des mesures de réception in situ – postes inclus dans le budget de la section 6.

5 La mise en œuvre: comment l'appliquer sur 150 km

La force de cette approche, c'est qu'elle s'industrialise. Les deux couches s'intègrent à des procédés déjà éprouvés par The Boring Company, répétés à l'identique sur 150 000 mètres.

5.1 – Le béton texturé: à l'usine, pas sur le chantier

Le revêtement du tunnel est fait d'anneaux de béton préfabriqués, posés par le tunnelier au fur et à mesure de son avancée. La texture ne s'ajoute pas après coup : elle est moulée **à l'usine de préfabrication**, en gravant le motif en relief directement dans les moules d'acier des voussoirs. L'anneau arrive donc déjà texturé, sans étape supplémentaire en tunnel. Le surcoût se limite à la conception des moules, à un démoulage un peu plus lent et à un contrôle qualité accru – pas au prix du béton lui-même.

5.2 – Les panneaux: modulaires et accessibles

Les panneaux du dôme sont posés après le revêtement, sur une ossature légère ancrée à l'anneau. Ils se présentent en **cassettes modulaires**, ce qui accélère la pose et permet d'y accéder plus tard pour l'entretien. L'espace derrière les panneaux sert d'ailleurs à loger câblage, conduits et luminaires – la doublure acoustique devient aussi un plénum technique.

5.3 – La continuité: l'exigence centrale

La règle d'or est la **continuité sur toute la longueur**. Une interruption du traitement crée un point dur réfléchissant – un « point chaud » acoustique qui ruine localement la performance. C'est justement la combinaison voussoirs texturés en usine + cassettes répétées qui rend cette continuité réaliste : un même jeu de pièces, dupliqué cent cinquante mille fois, sans improvisation sur le terrain.

5.4 – Une doublure 100% incombustible

Les trois matériaux – béton, laine de roche (minérale, qui fond au-delà de 1 000 °C) et métal – sont totalement incombustibles. La doublure acoustique **n'ajoute aucune charge combustible**. Dans un tunnel où le pire incendie crédible est l'emballage d'une batterie au lithium, c'est un atout majeur : le traitement du son est aussi un traitement du feu.

5.5 – La synergie avec la ventilation

Un ventilateur de tunnel brut crache 85 à 95 dB(A) à un mètre – intenable pour qui passe dessous. La même absorption qui tue l'écho ramène ce bruit à un fond doux et continu de **60 à 65 dB(A)**, un « ronronnement » de bruit blanc plutôt agréable, qui masque même les bruits parasites. Le poste acoustique ne sert donc pas qu'à supprimer l'écho : il rend la ventilation mécanique supportable.

6 Les coûts en détail

Le poste «Acoustique» du budget de construction s'établit à environ **450 M\$ pour 150 km**, rangé dans les systèmes techniques. Voici sa ventilation, bâtie par surface traitée et taux unitaire.

VENTILATION DÉTAILLÉE DU COÛT ACOUSTIQUE – RÉSEAU DE 150 KM

Poste	Base de calcul	Montant (M\$)
Panneaux acoustiques (laine de roche + métal perforé, ossature, pose)	660 000 m ² × ~300 \$/m ²	198
Béton texturé – surcoût vs revêtement lisse (moules à relief, coulage, contrôle)	495 000 m ² × ~180 \$/m ²	89
Traitements ponctuels (stations, croisements de tunnels, sas anti-fumée, jonctions)	forfait	40
Ingénierie acoustique, modélisation, prototypes 1:1, essais et mesures de réception	forfait	35
Sous-total		362
Contingence technique (20 %)	risques, imprévus	72
Total – poste «Acoustique»	≈ 3,0 M\$/km	≈ 434

Ce total d'environ 434 M\$ est porté à **450 M\$** dans le budget global, un arrondi prudent qui ajoute un coussin. Ramené à l'unité, cela donne :

- **3,0 M\$ par kilomètre** de tunnel ;
- **3 000 \$ par mètre** linéaire ;
- environ **300 \$ par m²** de surface intérieure traitée ;
- environ **5 %** du coût de construction total du réseau (≈ 8,9 G\$).

La nuance qui joue en faveur du projet. Une bonne partie du «béton texturé» n'est pas un coût réellement *nouveau* : les anneaux de revêtement sont déjà coulés et déjà payés dans la ligne «tunnels» (1,9 G\$). Les texturer ne change que le moule. Le seul véritable poste matériel additionnel, ce sont les panneaux du dôme. Le coût strictement *incrémental* de l'acoustique est donc plus bas — de l'ordre de 250 à 350 M\$ — et conserver 450 M\$ au budget offre une marge de crédibilité appréciable face à toute contestation.

Côté exploitation, l'acoustique est presque gratuite : béton, laine de roche et métal ne demandent **aucun entretien majeur pendant 30 ans et plus**. Aucune ligne dédiée n'apparaît donc au budget annuel ; le nettoyage occasionnel des panneaux est déjà compris dans l'entretien courant du tunnel.

7 Les bénéfices connexes

Au-delà de la suppression de l'écho, ce poste cumule des avantages rarement réunis :

- **Sécurité incendie** — une doublure entièrement incombustible, sans charge combustible ajoutée.
- **Ventilation supportable** — le bruit des ventilateurs ramené de 85–95 à 60–65 dB(A).
- **Durabilité** — aucun entretien majeur avant des décennies ; matériaux stables et inertes.
- **Esthétique** — les reliefs du béton et les panneaux créent, sous l'éclairage LED, des jeux d'ombre et de lumière qui donnent au tunnel une signature architecturale propre.
- **Intelligibilité et confort** — une conversation reste claire à trois mètres, un cri ne fait pas mal aux oreilles, les annonces de sécurité sont audibles.

8 Conclusion et limites

Transformer 150 km de tube de béton en un espace au confort sonore maîtrisé est un problème d'ingénierie bien borné, à la solution éprouvée : diffuser avec un béton texturé, absorber avec des panneaux de laine de roche et de métal perforé, le tout appliqué en continu. La physique confirme la faisabilité : on passe d'une réverbération de 6 à 8 secondes à une cible inférieure à deux secondes, avec une marge confortable. Le coût, environ 450 M\$ ou 3 M\$/km, représente à peine 5 % du projet — et son coût strictement nouveau est encore plus bas.

Les chiffres présentés sont des estimations de conception préliminaire. Le passage à un projet réel suppose trois étapes : une **modélisation acoustique détaillée** du tube et de ses raccordements, des **prototypes grandeur nature** mesurés en laboratoire, puis des **mesures de réception in situ** sur les premiers tronçons. Deux exigences doivent figurer noir sur blanc à l'appel d'offres : des **ventilateurs à silencieux** (sans quoi on dépasse 85 dB) et une **doublure acoustique continue**, sans interruption. À ces conditions, l'objectif d'une réverbération inférieure à deux secondes sur l'ensemble du réseau est parfaitement atteignable.

Vélo Tunnel Québec — Projet citoyen pour un réseau cyclable souterrain de 150 km dans la grande région de Québec, utilisant la technologie de tunnelier de The Boring Company.

Document préparé par Philippe Leblond · Juin 2026 · À titre informatif.