

CONCEPTION D'UN ÉCRAN ANTIBRUIT VÉGÉTALISÉ ANALYSE ACOUSTIQUE ET STRUCTURALE

Noureddine Atalla

Groupe d'acoustique de l'Université de Sherbrooke

et

Rémy Oddo

Groupe d'acoustique de l'Université de Sherbrooke

Réalisé pour le compte du Ministère des Transports

Juin 2007

La présente étude a été réalisée à la demande du ministère des Transports du Québec et a été financée par la Direction de la recherche et de l'environnement.

Les opinions exprimées dans le présent rapport n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement les positions du ministère des Transports du Québec.

Table des matières

1	<u>INTRODUCTION</u>	8
2	<u>CAHIER DES CHARGES :</u>	10
2.1	ASPECTS ESTHÉTIQUES :	10
2.2	VÉGÉTALISATION DU SITE :	11
2.2.1	VÉGÉTALISATION AU SOL	11
2.2.2	VÉGÉTALISATION DES SURFACES VERTICALES	11
2.2.3	VÉGÉTALISATION EN HAUTEUR	12
2.3	CAHIER DES CHARGES ACOUSTIQUE	14
2.3.1	GÉNÉRALITÉS SUR LE BRUIT ROUTIER	14
2.3.2	PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN ÉCRAN ANTIBRUIT :	17
2.3.3	PERTE PAR INSERTION D'UN ÉCRAN	20
2.3.4	TRAITEMENT ACOUSTIQUE DES PAROIS :	20
2.4	CAHIER DES CHARGES STRUCTURAL	22
2.4.1	CAS DES BUTTES À FORTE PENTE	22
2.4.2	CAS DES MURS VERTICAUX :	23
3	<u>INVENTAIRE DES DIFFÉRENTS TYPES DE MUR VERTICAUX</u>	25
4	<u>CRITÈRES DE DESIGN APPLIQUÉS AU PROJET DE LA ROUTE 116 À ST-HUBERT</u>	28
4.1	IDENTIFICATION DES CONFIGURATIONS POSSIBLES	28
4.2	ANALYSE DES CONFIGURATIONS RETENUES :	31
4.3	CONCEPT 1 : MUR SEUL	31
4.4	CONCEPT 2 : BUTTE COMBINÉE	32
4.5	CONCEPT 3 MUR SUR BUTTE AVEC ESPACE RIVERAIN MAXIMISÉ :	32
5	<u>CONCEPTION D'UN MUR VERTICAL LÉGER</u>	34
5.1	SYSTÈMES EXISTANTS	34
5.1.1	MURS EN PLANCHES JOINTIVES NON-ABSORBANTES	34
5.1.2	MURS DE TÔLE AVEC OU SANS PROPRIÉTÉS ABSORBANTES :	36
5.1.3	MUR DE BOIS AVEC ABSORBANT ACOUSTIQUE (ÉCRANS ECIB)	38
5.2	PROPOSITION D'UN CONCEPT LÉGER ET ÉCONOMIQUE D'ÉAV	40
5.3	CALCUL DES PROPRIÉTÉS ACOUSTIQUES DU MUR :	41
5.3.1	MÉTHODOLOGIE	41
5.3.2	CARACTÉRISATION D'UN PANNEAU DE CONTREPLAQUÉ 'MARINE'	41
5.3.3	MODÉLISATION DU PANNEAU ASSEMBLÉ :	44
5.4	CONCEPTION DES FONDATIONS :	47
6	<u>ABSORPTION ACOUSTIQUE DES SOLS</u>	48
6.1	GÉNÉRALITÉS	48

6.2	MESURE D'ABSORPTION EN TUBE DE KUNDT	48
6.2.1	PRINCIPE DE LA MÉTHODE	48
6.3	MESURE SUR DES ÉCHANTILLONS DE SOL VÉGÉTAL	49
7	<u>CONCLUSION :.....</u>	54

Liste des figures

Figure 1 : Niveau de bruit calculé à 100 et 200 m en fonction du type de revêtement (source : rapport GAUS pour la division des matériaux et infrastructures du MTQ)	15
Figure 2 : Illustration des différents phénomènes pouvant affecter l'efficacité d'un écran acoustique	17
Figure 3: Exemple typique de structure d'un matériau acoustique	21
Figure 4 : Effet des différents phénomènes physiques sur l'absorption d'un matériau.....	21
Figure 5 : Exemple de rupture en cercle profond.....	23
Figure 6 : Mur en ligne droite versus murs en ligne brisée.....	25
Figure 7 : Mur de 5 mètres de haut situé au centre de l'emprise (source CPEUM).....	31
Figure 8 : système mixte butte faible pente coté autoroute et butte forte pente avec zone de végétalisation coté résidents	32
Figure 9 : Mur proche de l'autoroute pour maximiser l'espace coté citoyen	33
Figure 10 : Mur proche de l'autoroute pour maximiser l'espace coté citoyens : rectification structurale	33
Figure 11: Écran routier en bois (photo Connecticut D.O.T), 2006	35
Figure 12 : vue de plan du mur de bois développé par le Connecticut D.O.T.....	35
Figure 13 : Montage des caissons à l'intérieur des montants (source : www.acoustock.com).....	36
Figure 14: Écran acoustique monté avec recouvrement (Écran AU069 (source : Mice protection acoustique).....	37
Figure 15 : Vue en coupe d'un écran acoustique Criteria (www.acoustock.com).....	38
Figure 16 : Vue éclatée d'un panneau de bois absorbant (source www.ecib-bruit.com).....	39
Figure 17 : Vue en coupe du concept proposé	40
Figure 18 : Vue de la chambre réverbérante (local source)	42
Figure 19 : Panneau de contreplaqué, vu côté local récepteur (droite) et vue de la chambre semi-anéchoïque (gauche)	42
Figure 20 : Perte par transmission mesurée et calculée pour un panneau de contreplaqué type marine	43
Figure 21 Effet de l'épaisseur du film protecteur sur l'absorption acoustique	44
Figure 22: Effet de l'épaisseur du film protecteur sur l'absorption acoustique	45
Figure 23 : Effet de l'épaisseur d'un panneau de contreplaqué seul sur la perte par transmission	46
Figure 24 : Effet de l'assemblage complet sur la perte par transmission du mur	46
Figure 25 : Principe de fonctionnement du tube d'impédance	48
Figure 26 : Coefficient d'Absorption d'un sol en sable.....	50
Figure 27: Coefficient d'absorption d'un sol herbeux légèrement compacté	51
Figure 28 : Coefficient d'absorption d'une plate bande recouverte de paille végétal	51

Figure 29 : Coefficient d'absorption de plate-bande recouverte de terre végétale très aérée	52
Figure 30 : Coefficient d'absorption d'un sol végétal selon différentes conditions	53

Liste des tableaux

Tableau 1 : Critères de conception du mur anti-bruit	18
Tableau 2 : Valeurs de longueur d'arrête de semelles carrées calculées pour différents types de sols et une profondeur de 2 m (mur de 3.6m de haut, soutenu par des pieux espacés de 3.6m)	24
Tableau 3 : Inventaire des différents types de murs verticaux.....	25
Tableau 4 : Liste des concepts possibles pour le projet de la route 116 à St hubert	28
Tableau 5 : Propriétés acoustiques d'un écran Critéria de 4'' (Source Acoustock)	37

1 INTRODUCTION

L'objectif de cette étude est de concevoir un écran antibruit végétalisé pouvant être installé en zone urbaine ou faiblement urbanisée. Ce nouvel écran doit constituer une alternative 'verte' permettant une meilleure acceptabilité auprès des riverains et une meilleure intégration dans le paysage que les murs actuellement utilisés. Cette étude découle entre autre de l'intérêt suscité par les projets pilotes réalisés par un chercheur du jardin botanique de Montréal dans les régions de St-Bruno et Boisbriand.

Dans le cadre de notre étude, les zones fortement urbanisées, constituées d'édifices de grande hauteur et à emprise étroite, ont été exclues. Le nouveau concept doit pouvoir être mis en œuvre sur des emprises dont la largeur varie entre 5 et 25 m. Ce type de configuration se retrouve fréquemment dans la zone couverte par la direction de la Montérégie du ministère des transports, demanderesse de l'étude. Lorsque les emprises sont de plus grande largeur, la réalisation de buttes conventionnelles recouvertes de végétaux constitue une alternative reconnue et efficace.

Les différents objectifs retenus à l'origine du projet pour la conception de ce mur sont les suivants :

1. réduction du bruit provenant de la route à un niveau de performance comparable aux solutions retenues à l'heure actuelle;
2. amélioration de l'esthétique;
3. résistance des matériaux et viabilité des végétaux;
4. coût raisonnable de l'ouvrage installé;
5. acceptabilité de la part des riverains.

Le projet a été mené en étroite collaboration avec la Chaire en Paysage et Environnement de l'Université de Montréal (CPEUM) qui était responsable des aspects esthétiques et végétaux. Le Groupe d'Acoustique de l'Université de Sherbrooke (GAUS) était lui responsable des aspects acoustiques et structuraux du nouvel ouvrage. L'intégration de ces différentes disciplines, complémentaires et essentielles dans le cadre du projet, mais à priori fort différentes, a été l'objet d'une attention particulière afin de s'assurer de la réussite du projet.

L'étude s'est déroulée en 3 phases. Dans un premier temps, les deux équipes ont effectué une étude bibliographique. Cette étude a débouché sur la rédaction d'un cahier des charges couvrant les différents aspects du projet. Une fois le cahier des charges réalisé, les deux équipes se sont attachées à développer conjointement différents concepts pouvant être appliqués. Les deux rapports produits doivent être utilisés à la manière de 'boîte à outils' complémentaires afin de réaliser des écrans antibruit pouvant être appliqués dans différentes configurations. Il est important de noter que tant du point de vue acoustique que paysager, l'intégration d'un écran antibruit doit tenir compte des caractéristiques locales de l'ouvrage. Afin de s'assurer de la viabilité des solutions proposées, il a été convenu avec la CPEUM et le MTQ d'adopter une approche par projet. Ceci permet d'illustrer de façon pratique la mise en application des concepts retenus.

Dans notre cas, le site principal retenu est celui de la route 116, à St-Hubert, proche du Boulevard Cousineau.

Des points de vue acoustiques et structuraux, les solutions sont généralement connues et bien documentées. Il existe des règles claires et chiffrées pour évaluer la performance acoustique ou la résistance structurale d'un ouvrage. De nombreuses solutions techniques sont envisageables. Par contre, les critères d'acceptabilité ou d'esthétique sont très dépendants de l'environnement immédiat ou lointain de l'ouvrage. Ces critères doivent donc être pris en compte de façon prioritaire afin de s'assurer de la rencontre de l'ensemble des objectifs du projet. Nous présenterons ici les différentes solutions technologiques applicables pour la réalisation d'un écran antibruit efficace des points de vue acoustique, structuraux et en terme de coût. Toutefois, le choix de ces solutions est pré-conditionné aux critères esthétiques, environnementaux et de végétalisation du site. Lors de cette étude, nous nous sommes assurés avec la CPEUM que les solutions mises en œuvre du point de vue esthétique ou végétal soient conformes au cahier des charges techniques que nous avons développé. Les deux rapports fournis sont donc complémentaires, mais une fois les performances acoustiques minimales déterminées (essentiellement la hauteur de l'ouvrage et les caractéristiques de surface côté route), le concepteur devra s'appuyer sur les considérations environnementales pour déterminer le choix d'une solution appropriée et s'intégrant dans l'environnement du nouvel ouvrage.

2 CAHIER DES CHARGES :

2.1 Aspects esthétiques et acceptabilité de la part des riverains :

L'ensemble des critères présentés ici proviennent du rapport final produit par la CPEUM [1]. Le lecteur devra donc se référer à ce document afin d'obtenir une description détaillée des éléments présentés dans ce chapitre.

L'approche utilisée se doit d'être différente selon que l'on regarde le projet vu du côté riverain ou du côté autoroutier. D'une manière générale, on privilégiera lorsque possible les aménagements côté riverain afin d'augmenter l'acceptabilité de l'ouvrage.

Toujours en citant les travaux de la CPEUM réalisés lors de ce projet, les différents critères esthétiques côté autoroutier sont :

- *maintenir ou améliorer le dynamisme du parcours pour contrer la monotonie et l'effet de couloir inhérents à la présence d'un écran linéaire en bordure du corridor (Houlet, 1993) ;*
 - *rechercher un effet global de légèreté pour contrer la massivité d'un mur de plusieurs mètres de hauteur à proximité de la chaussée (idem) ;*
 - *rechercher un effet global d'unité avec un paysage d'ensemble (paysage autoroutier) ;*
- pour ce qui est du paysage riverain :
- *rechercher un effet global de légèreté pour contrer la massivité d'un mur de plusieurs mètres de hauteur à proximité des habitations ;*
 - *rechercher un effet global d'unité avec un paysage d'ensemble (le paysage riverain).*

La définition des critères ainsi que leur mise en œuvre dans le cas particulier de la route 116 à St-Hubert sont détaillés dans le rapport de la CPEUM.

Les principaux liens entre les aspects esthétiques et acoustiques proviennent de 2 éléments :

- la hauteur du mur, qui doit être suffisamment importante afin d'être efficace acoustiquement;
- le type de revêtement sur la face côté autoroute, qui dans certain cas doit être constitué de matériaux acoustiques absorbants (béton absorbant ou laine minérale ensachée protégée par une grille). Cette contrainte va donc limiter les aspects de surface du mur. Cet élément sera discuté plus en détails dans la section acoustique du cahier des charges.

Côté résidences, le revêtement du mur n'a aucune influence sur l'efficacité du système. Le designer est donc libre de choisir tout type de revêtement ou de texture côté résidant.

2.2 Végétalisation du site :

2.2.1 Végétalisation au sol

La végétalisation du site est soumise à des contraintes beaucoup plus importantes du côté autoroute que du côté résidentiel. Ceci est surtout dû à la présence d'embruns salins.

Lors de la première phase de l'étude, on a montré de façon évidente que le coefficient d'absorption des sols est très dépendant de leur compactage [3]. Selon le paragraphe du rapport de la CPEUM consacré aux embruns salins, ils provoquent à terme une compaction plus importante des sols. Différentes méthodes sont proposées afin de limiter les effets des embruns salins.

Ces méthodes sont principalement de 2 types :

- installation rapide d'un couvert végétal herbacé résistant aux embruns salins ou, dans le cas de plantations d'arbustes, recouvrir le sol d'un paillis permettant rapidement l'élimination des dépôts salins.
- au printemps, arrosage des portions de terrain affectées par les embruns salins afin de drainer les résidus de chlorure de sodium et donc d'éviter leur accumulation dans le sol.

Dans tous les cas, le sol doit être très bien drainé en surface afin de favoriser une meilleure élimination des dépôts dus aux sels de déglacage. L'érection d'un mur va également contribuer au confinement des embruns salins à l'intérieur de l'emprise comprise entre la voie de circulation et le mur. Ceci permet donc de protéger très efficacement la zone côté riverain, mais implique l'instauration de mesures préventives (drainage) et rectificatrices (lessivage au printemps) importantes du côté de la voie de circulation.

On peut tout de même s'attendre à ce qu'au cours des années, le sol se compacte suffisamment pour perdre ses propriétés absorbantes. Le maintien d'une couche superficielle suffisamment aérée pour permettre une bonne perméabilité acoustique du sol exigera un travail régulier, entraînant des coûts d'entretien importants, et donc incompatibles avec les contraintes économiques de l'ouvrage.

D'un point de vue pratique, il ne faut pas compter utiliser sur le long terme les propriétés acoustiquement absorbantes de différents types de sol en bordure d'autoroute. La fonction d'absorption acoustique de l'écran doit donc être uniquement assumée par des revêtements de surface sur les murs verticaux.

Du côté résidant, aucune propriété acoustique du sol est nécessaire. Seuls les aspects esthétiques sont donc à prendre en compte.

2.2.2 Végétalisation des surfaces verticales

Différents systèmes de végétalisation des surfaces verticales sont disponibles. Principalement, ces systèmes sont de 3 types :

- implantation des végétaux sur toute la surface du mur avec substrat pour le système racinaire
- végétalisation de la surface du mur dans des niches avec substrat végétal
- végétalisation de la surface du mur à l'aide de plantes grimpantes.

La première solution présente dans l'absolu des avantages acoustiques et esthétiques indéniables. Le substrat utilisé pour l'implantation des racines est généralement poreux et a de bonnes propriétés acoustiques. Il permet la croissance d'une relativement grande variété de végétaux. Par contre, son application dans le contexte autoroutier du Québec est impossible en raison des hivers rigoureux que nous connaissons ainsi que des coûts d'installation et d'entretien exorbitants (systèmes d'irrigation, remplacement des végétaux, etc.). Cette solution aurait par contre des applications intéressantes dans des contextes très spéciaux d'aménagement urbain sur de faibles surfaces.

L'implantation de niches végétales sur la paroi du mur se heurte à la même problématique hivernale. De plus, en saison estivale, cette solution implique elle aussi l'installation d'un système d'arrosage rendant son application impossible. L'effet acoustique des niches est nul. Cette solution est donc elle aussi rejetée.

La seule végétalisation possible des surfaces verticales implique l'utilisation de plantes grimpantes. La CPEUM décrit de façon exhaustive l'utilisation et la mise en œuvre de ces plantes [2]. Du point de vue acoustique, le feuillage n'apporte qu'une absorption marginale des ondes sonores. Dans le cas où un traitement acoustique des surfaces du mur doit être apporté, l'implantation de plantes grimpantes ne peut pas être envisagée en tant que solution acoustiquement efficace. Seul un traitement absorbant de la surface exposée au bruit pourra être envisagé. Dans ce cas, la végétalisation du mur à l'aide de plantes grimpantes doit être faite de manière à s'assurer que les végétaux ne viennent pas à long terme dégrader les surfaces absorbantes. Dans le cas de murs en béton absorbant, les végétaux devront être régulièrement taillés afin de pouvoir nettoyer les surfaces du mur et les débarrasser des dépôts pouvant obstruer les pores du matériau absorbant. Si les pores de surface du matériau sont obstrués, le matériau va perdre son efficacité acoustique. Dans le cas où le matériau acoustique est constitué de laine de roche ensachée, il est important de s'assurer que le végétal ne viendra pas dégrader le système de protection de la laine. L'arrachement des végétaux agrippés au sac de protection pourrait l'endommager, entraînant alors une perte d'étanchéité du système et une dégradation rapide et une pourriture du matériau ensaché. Un système de protection mécanique additionnel, composé par exemple d'une tôle perforée devrait alors être envisagé.

2.2.3 Végétalisation en hauteur

La végétalisation en hauteur est assurée essentiellement par la canopée des arbres plantés en bordure de l'écran. D'un point de vue esthétique, cette végétalisation permet de casser la structure linéaire du mur. Elle permet également de diminuer l'effet de confinement et de corridor tel que

décrit par la CPEUM. Du côté résidantss, elle permet de masquer le mur et rend son acceptation plus facile.

D'un point de vue acoustique, l'effet est négligeable, avec une absorption résiduelle seulement observée en hautes fréquences et sur des distances relativement importantes. Les arbres plantés en bordure de l'écran ne doivent pas présenter de grandes surfaces de tronc pouvant favoriser la diffraction des ondes acoustiques. Il est donc important de choisir des types d'arbres dont le tronc principal ne dépasse pas la hauteur maximale de l'écran. Cette préoccupation est déjà prise en compte dans la conception des buttes acoustiques telle que décrite par la Ministère des transports.

L'effet des branches de faible diamètre sera négligeable. Dans le contexte Québécois, l'efficacité acoustique des écrans est surtout importante en période estivale. En hiver, les habitants vivent surtout à l'intérieur, vitres fermées, et sont donc mieux protégés des bruits extérieurs.

2.3 Cahier des charges acoustique

2.3.1 Généralités sur le bruit routier

Le bruit routier dépend essentiellement du type de trafic observé. Les paramètres importants à prendre en compte sont :

- la vitesse moyenne des véhicules
- le nombre et le type de véhicules par heure.

Généralement, une voie à grande circulation est considérée comme étant une source linéique de bruit. A un instant donné, chaque véhicule constitue une source mobile de bruit dont la répartition spatiale peut être considérée comme une succession de sources ponctuelles et fixes. Plus le trafic est important, plus la densité de sources est importante. Finalement, on se retrouve avec une succession de sources formant un continuum le long de la route. Si pour une source ponctuelle, la diminution de bruit en fonction de la distance est de 6 dB par doublement de la distance, dans le cas d'une source linéique, la diminution n'est plus que de 3 dB par doublement de la distance.

Le bruit généré par un véhicule provient de différentes sources :

- bruit du système d'échappement
- rayonnement direct du moteur
- bruit de roulement.

Au-delà de 40 km/h, on considère que le bruit de roulement devient la source principale pour les véhicules légers. Cette limite est repoussée à 70 km/h pour les véhicules lourds. En combinant les différentes sources de bruit, on peut évaluer la hauteur moyenne de génération du bruit pour chaque catégorie de véhicule.

Pour un véhicule léger, on considère que le bruit est uniquement généré au niveau du sol. Pour des camions moyens, la hauteur de source considérée est de 0.7 m. Pour des camions lourds, la hauteur moyenne est de l'ordre de 2.4m.

On voit bien à partir de cet exemple que la hauteur d'un mur antibruit sera directement conditionnée par le type de trafic sur la voie de circulation considérée. La première action à prendre avant de considérer l'implantation d'un mur antibruit est d'effectuer un comptage routier sur la section à protéger.

De nombreux logiciels commerciaux permettant d'évaluer le bruit généré par une voie de circulation en fonction de son achalandage sont disponibles. L'un des logiciels les plus utilisés est le logiciel TMN, développé en collaboration avec les organismes de régulation du transport aux États-Unis d'Amérique. La plupart des sociétés spécialisées en acoustique du Québec utilisent ce logiciel pour évaluer l'impact du bruit routier dans l'environnement.

Des mesures de bruit environnementales, effectuées sur des périodes de temps représentatives sont également indispensables afin d'évaluer l'efficacité acoustique minimale que devra rencontrer l'ouvrage envisagé.

Il existe toutefois une relation importante entre le niveau de bruit généré par une voie de circulation et la qualité du revêtement de chaussée utilisé. En 2006, le GAUS a effectué une campagne de mesure sur l'absorption acoustique des différents enrobés utilisés au Québec [4]. Cette étude a été commandée par la division du Service des Matériaux d'Infrastructure du MTQ et supervisée par Mme Danielle Fleury. Lors de cette étude, nous nous sommes informés sur les différentes sources du bruit de roulement. À partir des données fournies par le MTQ, nous avons classifié le bruit émis à 100 m ou 200 m par différents enrobés.

La courbe suivante montre le niveau de bruit ressenti à 100 ou 200 m tel que calculé à l'aide du logiciel ISO dB2 de Soft dB et à partir des mesures effectuées par la division du service des matériaux d'infrastructure du MTQ sur différents types d'enrobés. Les niveaux montrés ici sont donnés à titre indicatif. Seuls les écarts entre les différents tests sont valides.

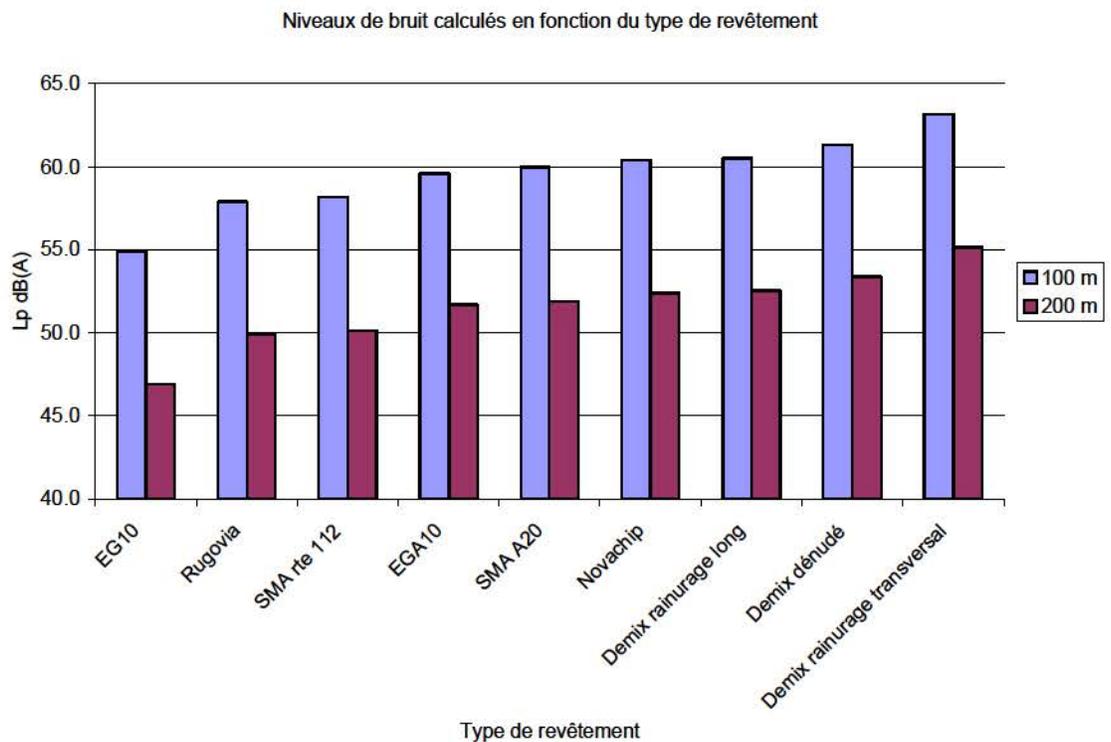


Figure 1 : Niveau de bruit calculé à 100 et 200 m en fonction du type de revêtement (source : rapport GAUS pour la division des matériaux et infrastructures du MTQ)

On remarque des écarts de près de l'ordre de 8 dB(A) pour les différents types d'enrobés. Si on exclu les enrobés en béton, généralement plus bruyants que ceux à base d'asphalte, les écarts restent supérieurs à 5 dB(A). Les mesures du MTQ ont été effectuées sur des portions de route

d'usure différente, mais généralement en bon état. Dans le cas d'une route dégradée, on peut imaginer que les écarts seraient encore plus importants. Les résultats présentés lors de cette étude montrent clairement que le niveau de bruit généré par une voie de circulation pourrait être grandement diminué par la réfection de chaussées endommagées. Cette variable essentielle doit donc être prise en compte avant l'érection d'un mur antibruit. En effet, la réfection de la chaussée permettra d'abord d'accroître sa longévité. Elle pourra aussi dans certains cas éviter la mise en œuvre d'écrans antibruit coûteux dont la fonctionnalité première ne correspond pas aux objectifs principaux de qualité et d'entretien du système routier.

En Europe, l'utilisation d'enrobés drainants permet à la fois de diminuer considérablement les risques d'aquaplanage, les projections d'eau sur le pare-brise et apporte des gains de l'ordre de 10 dB(A) sur le bruit généré par le roulement des véhicules. Cette technologie n'est malheureusement pas applicable sur le réseau routier Québécois en raison de nos contraintes climatiques nordiques. Toutefois, on remarque ici que des gains importants pourraient être réalisés du point de vue acoustique en maîtrisant bien les phénomènes d'interaction pneu-route sur les enrobés classiques.

2.3.2 Principe de fonctionnement d'un écran antibruit

Le rôle premier d'un écran antibruit est de bloquer la propagation des ondes sonores entre la source et le récepteur. La principale propriété acoustique d'un mur devrait donc être sa perte par transmission, c'est-à-dire sa capacité à bloquer le son. Dans le cas d'un mur infiniment haut, plus sa perte par transmission est élevée, plus son efficacité est importante. Dans notre cas, les murs ont forcément une hauteur finie. Ceci veut dire que les ondes sonores pourront les contourner. Le principal phénomène de contournement provient de la diffraction au sommet du mur. La figure suivante montre comment ce phénomène intervient. Les ondes sonores contournent le sommet de mur selon ce qu'on appelle un angle de diffraction. Cet angle est d'autant plus grand que la largeur de l'arrête supérieure du mur est petite face à la longueur d'onde. Finalement, la perte par transmission intrinsèque du mur (sa capacité à diminuer le son) n'est pleinement effective que dans la zone d'ombre. Au-delà, les phénomènes de diffraction acoustique vont diminuer son efficacité.

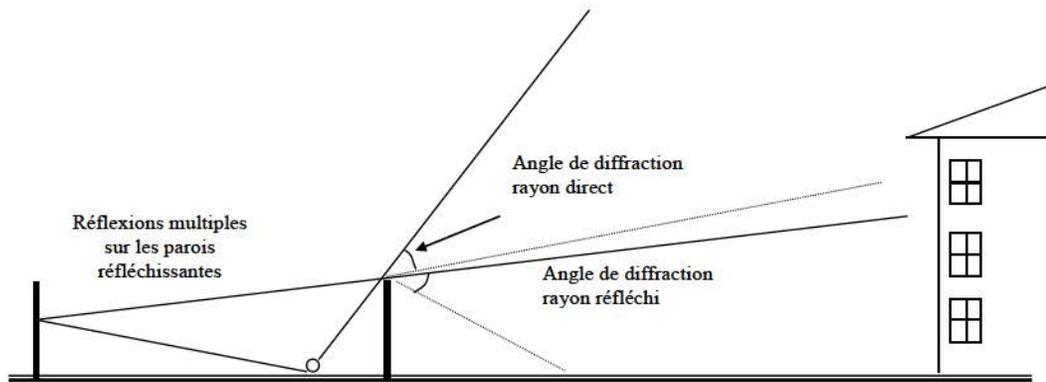
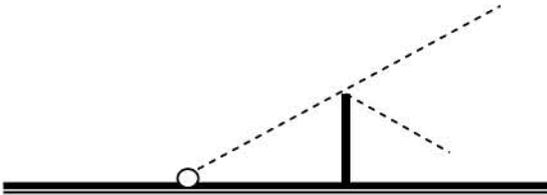
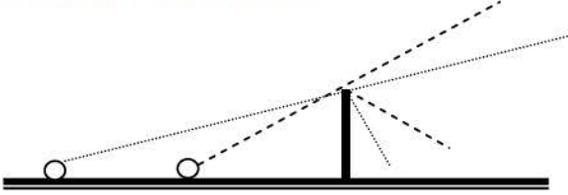
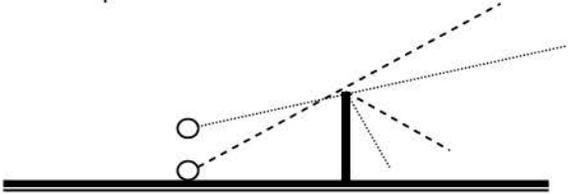


Figure 2 : Illustration des différents phénomènes pouvant affecter l'efficacité d'un écran acoustique

D'autres phénomènes, comme les réflexions multiples sur des parois parallèles, la hauteur des points récepteurs ou encore la hauteur des sources vont influencer l'efficacité acoustique de l'écran. L'ensemble de ces paramètres doit donc être pris en considération lors la conception de l'écran.

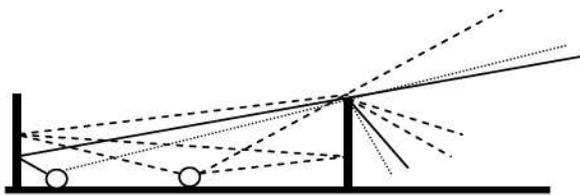
Le tableau suivant résume les différents éléments à vérifier lors de la conception du mur :

Tableau 1 : Critères de conception du mur antibruit

Environnement de l'ouvrage	Impact sur la conception du mur
<p style="text-align: center;">Paramètres liés au trafic</p> <p>Essentiellement composé de voitures légères ou camions légers. Peu ou pas de camions lourds</p> 	<p>Mur de faible hauteur La hauteur des sources est proche du sol. Possibilité de traiter efficacement le bruit à l'aide d'un mur de faible hauteur (3m)</p>
<p>Nombre de voies de circulation</p> 	<p>La hauteur du mur augmente avec le nombre de voies de circulation Plus les voies de circulation sont nombreuses, plus l'angle d'incidence des ondes provenant des voies de circulation éloignées sera faible sur l'arrête du mur. Ceci aura pour effet de rabattre les ondes diffractées plus rapidement vers le sol. Pour un grand nombre de voies de circulations ou une largeur de route importante, la hauteur du mur devra être augmentée (ex. pour des routes de 6 à 8 voies, on doit utiliser des murs de plus de 7m de haut).</p>
<p>Trafic composé de nombreux véhicules lourds :</p> 	<p>La hauteur du mur augmente avec le nombre de véhicules lourds Lorsque le trafic est composé de nombreux véhicules lourds, la hauteur de source moyenne est augmentée. De plus, le niveau de bruit émis par les véhicules lourds est beaucoup plus important. Dans ce cas, la hauteur du mur devra être augmentée</p>

Paramètres liés à l'environnement

Zones sensibles à protéger des 2 côtés de la route



Installation de 2 écrans parallèles, avec traitement acoustique sur les faces exposées au bruit

Lorsque les 2 côtés de la voie de circulation doivent être traités, l'installation de 2 écrans en parallèle est nécessaire. Les deux écrans forment un système de couloir à l'intérieur duquel les ondes sonores rebondissent et arrivent finalement avec une faible incidence sur l'arrête du mur. Ceci a pour effet d'accentuer les phénomènes de diffraction. Pour éviter ce phénomène de réflexions multiples, il est nécessaire de traiter les faces exposées au bruit à l'aide d'un matériau absorbant.

Zone sensible située en face de l'ouvrage, à une certaine distance



Matériau absorbant sur le mur

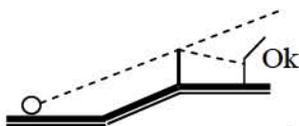
Si une zone sensible se trouve en face de la zone traitée, il est nécessaire de placer un matériau absorbant sur la face exposée au bruit de l'écran. **Positionner le mur de préférence proche de la source.**

Si cette combinaison est impossible, positionner le mur proche du récepteur. Éviter la zone intermédiaire

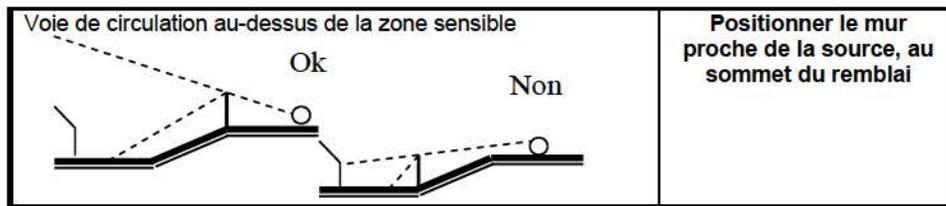
Voie de circulation à même hauteur que la zone sensible



Voie de circulation en contrebas par rapport à la zone sensible



Positionner le mur au sommet du remblai



2.3.3 Perte par insertion d'un écran

La perte par transmission acoustique d'une paroi est le critère qui permet de chiffrer le rapport entre l'énergie acoustique incidente et l'énergie acoustique transmise. Dans notre cas, cette donnée va être intrinsèque à la composition de la paroi elle-même. On rappelle également ici la différence entre la perte par transmission, qui ne fait intervenir que la paroi elle-même, et la perte par insertion, qui représente la différence de niveau de bruit en un point avant et après l'installation de cette paroi. Dans le cas de la perte par insertion, on devra tenir compte de la perte par transmission de la paroi, mais aussi de tous les autres phénomènes géométriques ou de propagation qui peuvent intervenir.

Le phénomène de diffraction des ondes acoustiques sur l'arrête supérieure de l'écran est la principale cause de la baisse de la perte par insertion de l'écran (ou son efficacité acoustique réelle une fois installée). Par exemple, on cite dans l'étude bibliographique que l'efficacité acoustique globale d'un écran de 5 m de haut est inférieure à 15dB(A) à 15 m du mur. Par contre, l'efficacité intrinsèque des parois d'un mur en béton conventionnel (ou perte par transmission) dans la zone de fréquence du bruit routier est supérieure à 40 dB. Ceci veut dire que la composante du bruit traversant directement le mur est au moins 25 dB inférieure à la portion du bruit ayant 'contourné' l'ouvrage. La fraction de l'énergie acoustique ayant traversé directement le mur ne représente que 3 millièmes de l'énergie acoustique totale reçue. Si la perte par transmission acoustique du mur dans la zone de fréquence du bruit routier avait été de 30dB, la portion de l'énergie acoustique provenant des ondes ayant traversé le mur aurait été de l'ordre de 3%. Ce résultat est très important. Il montre que la perte par transmission des matériaux constituant le mur n'intervient que très faiblement dans son efficacité totale. Ce résultat nous permettra de nous orienter vers des choix technologiques plus légers et de moindre coût que les murs conventionnels en béton.

2.3.4 Traitement acoustique des parois

Les traitements acoustiques des parois sont nécessaires uniquement pour un certain nombre de configurations routières. Ces configurations sont :

- présence d'une zone sensible de l'autre côté de la voie de circulation ;
- installation d'écrans parallèles

Dans toutes les autres configurations d'implantation d'un écran antibruit, les traitements absorbants de la paroi côté route seront inutiles.

Les matériaux absorbants acoustiques sont des matériaux poreux dont les pores sont interconnectés et ouverts. L'intérieur des pores est rempli d'air. Ils agissent en dissipant l'énergie acoustique de l'onde incidence en chaleur dans la structure du matériau.

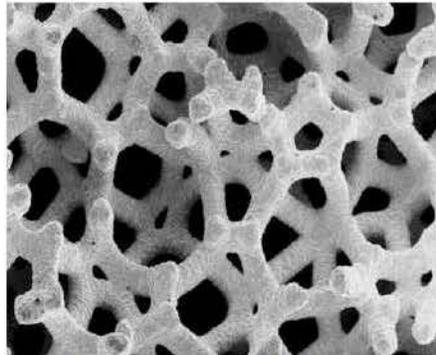


Figure 3: Exemple typique de structure d'un matériau acoustique

Deux phénomènes physiques permettent la dissipation de l'énergie acoustique en chaleur :

- dissipation visqueuse
- dissipation thermique

La courbe suivante montre la façon dont ces deux phénomènes peuvent intervenir sur l'absorption totale d'un matériau.

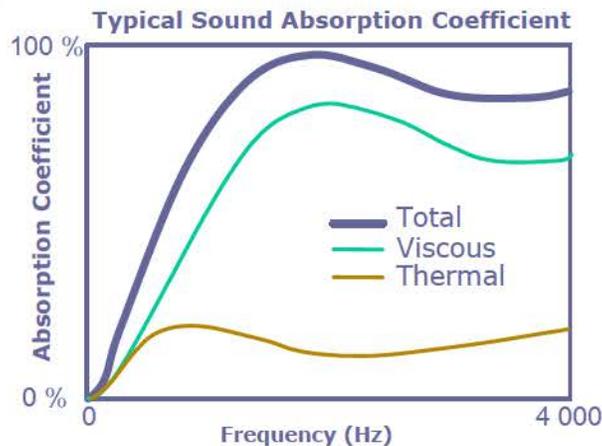


Figure 4 : Effet des différents phénomènes physiques sur l'absorption d'un matériau

Pour chaque mode de dissipation, l'absorption acoustique est nulle en basse fréquence puis augmente progressivement.

Les différents paramètres influant sur l'efficacité acoustique d'un matériau poreux sont :

- porosité: La porosité est définie comme étant le rapport de volume occupé par l'air dans les pores interconnectés sur le volume total.
- résistance à l'écoulement: La résistance à l'écoulement exprime le retard dû à la friction lors d'un écoulement quasi-statique à travers les pores (ici l'onde sonore qui pénètre dans le matériau). C'est équivalent à la chute de pression nécessaire pour provoquer un écoulement à travers le matériau.
- tortuosité: La tortuosité est un paramètre géométrique qui indique la déviation subie à travers le matériau par rapport au chemin direct.
- longueurs thermiques et visqueuses: Ces deux longueurs représentent les dimensions moyennes des cellules reliées respectivement aux pertes visqueuses (échange de chaleur dans les cellules de petite taille) et les pertes thermiques (échange de chaleur dans les cellules de grande taille).

D'un point de vue pratique, on voit que l'ensemble des matériaux absorbants acoustiques sont des matériaux présentant des pores généralement de petite taille. Ceci entraîne 2 problèmes :

- au cours du temps les pores peuvent se boucher, diminuant l'efficacité acoustique du matériau
- de l'eau peut pénétrer à l'intérieur du matériau et éventuellement le dégrader.

Dans le contexte routier, seules deux grandes classes de matériaux acoustiques sont utilisées :

- les bétons absorbants (et leurs variantes).
- les laines minérales, ensachées dans une fine pellicule de matériau étanche et protégées mécaniquement par une tôle perforée ou un treillage de bois.

Les bétons absorbants doivent faire l'objet d'un entretien régulier afin d'éviter que leurs pores ne se bouchent, ce qui les rendraient inopérants du point de vue acoustique.

Les dispositifs de protection des panneaux en laine minérale doivent être suffisamment résistants pour résister sur de grandes périodes de temps.

Dans tous les cas, les systèmes devraient être de type modulaire afin de pouvoir éventuellement remplacer les éléments endommagés.

2.4 Cahier des charges structural

2.4.1 Cas des buttes à forte pente

Le premier critère structural à étudier avant l'implantation d'un écran acoustique est la capacité du sol à supporter l'ouvrage. Ce critère est d'autant plus important dans le cas de l'érection d'écrans constitués de buttes à forte pente. Les buttes sont constituées de remblais souvent massifs, retenus par un système mécanique destiné à stabiliser la pente. On parle ici d'ouvrages pouvant atteindre 3 ou 5 mètre de haut.

Une mauvaise préparation du sol sous le futur remblai pourrait entraîner une rupture en cercle de fond. Cette rupture est généralement due à une

faiblesse structurale du sous-sol sur lequel est implanté l'ouvrage. Dans le cas des buttes à forte pente, on observe une variation très rapide des charges appliquées au pied de la butte. Cette variation entraîne des concentrations de contraintes locales importantes au pied de l'ouvrage pouvant favoriser les ruptures en cercle profond. Des campagnes de forage destinées à déterminer la capacité portante des sols sont indispensables.

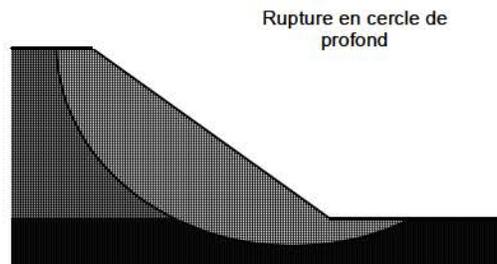


Figure 5 : Exemple de rupture en cercle profond

Différentes mesures préventives peuvent être prises afin de limiter ce problème. La première peut consister en l'utilisation de remblais de moindre masse, de type pneu-sol par exemple. Les fournisseurs de renforts de stabilisation des buttes à forte pente (ex. Maccaferri) proposent des agencements en pied de butte permettant d'aider à leur stabilité.

2.4.2 Cas des murs verticaux

Ce cas couvre à la fois les murs simples ou les arrangements mixtes composés d'un mur vertical situé sur une butte de faible hauteur.

Typiquement, on considère que la limite de gel dans le sous-sol est de 2 mètres. Il est donc indispensable de construire le nouvel ouvrage sur des semelles ayant au moins 2 mètres de profondeur.

Le calcul des fondations fait intervenir à la fois la profondeur ainsi que la largeur de semelle. Dans tous les cas, les fondations doivent être creusées jusqu'à au moins 2 mètres de profondeur.

Le tableau suivant tiré du rapport d'étape remis à mi-projet, récapitule les valeurs calculées de la longueur de l'arrête de la semelle (carrée) qui respecte les conditions de tassement et de rupture pour différent type de sol :

Dans ce cas, l'écran est un mur à structure discontinue, composé soit de panneaux de bois ou de béton de 50 mm d'épaisseur et 3.6 m de haut (12'). Les panneaux sont supportés par des pieux de 5.6 m de haut espacés de 3.6m.

Les calculs de semelle ont été réalisés pour du sable, du Till ou de l'argile. Dans ce dernier cas, les valeurs ne sont qu'approximatives et il serait nécessaire d'effectuer des forages et des tests de pénétration afin de valider les ordres de grandeur.

Tableau 2 : Valeurs de longueur d'arrête de semelles carrées calculées pour différents types de sols et une profondeur de 2 m (mur de 3.6m de haut, soutenu par des pieux espacés de 3.6m)

	Bois (m) ($\gamma_{bois} = 10 \text{ kN/m}^3$)	Béton (m) ($\gamma_{béton} = 22 \text{ kN/m}^3$)
Till	0.15	0.23
Sable	0.20	0.21
Argile	0.39	0.58

Le critère de résistance au gel est plus sévère que celui de résistance au vent. L'utilisation des systèmes de fondation classiques (Sonotubes) installés dans la zone hors gel est suffisante pour assurer la résistance au vent de l'ouvrage.

Les coûts de forage pourraient être diminués en utilisant des fondations constituées de pieux vissés. Si ces systèmes possèdent une excellente résistance à la compression ou à la traction, leur force latérale est beaucoup plus faible que celle des fondations classiques. L'utilisation de murs ayant un profil en ligne brisée permettrait de compenser les faiblesses latérales des pieux vissés en transférant les efforts latéraux en efforts de traction et de compression sur les pieux adjacents. Le transfert des efforts est assuré par les panneaux installés entre les différents pieux. Ceci implique donc que les panneaux soient dimensionnés pour transférer les efforts. Dans le cas des installations de murs modulaires, les panneaux n'ont aucun rôle structural. Ils sont donc conçus de façon plus légère et ne permettent généralement pas le transfert des efforts.

La figure suivante présente différentes configurations de murs en ligne brisée. La configuration a) est celle qui présente le meilleur rapport en terme3 de coûts car elle nécessite quasiment le même nombre de pieux de forages et de montants de mur. Par contre, la rigidité en flexion des panneaux est un paramètre critique. Ils risquent de se déformer plutôt que de transmettre les efforts. Les autres configurations impliquent l'utilisation d'un nombre plus important de pieux et montants, ce qui augmente les coûts. Par contre, elles permettront d'utiliser des panneaux transversaux de plus petite taille et donc permettant un meilleur transfert des efforts transversaux pour une longueur donnée.

Dans le cas de la configuration b), les murs de refend disposés perpendiculairement sont très courts et travaillent uniquement en compression. Ils vont présenter une meilleure résistance et donc un meilleur transfert des efforts latéraux en effort verticaux sur les pieux avoisinants. Dans tous les cas, l'utilisation de cette technologie doit faire

l'objet d'une étude spécifique approfondie de la part du maître d'œuvre de l'ouvrage.

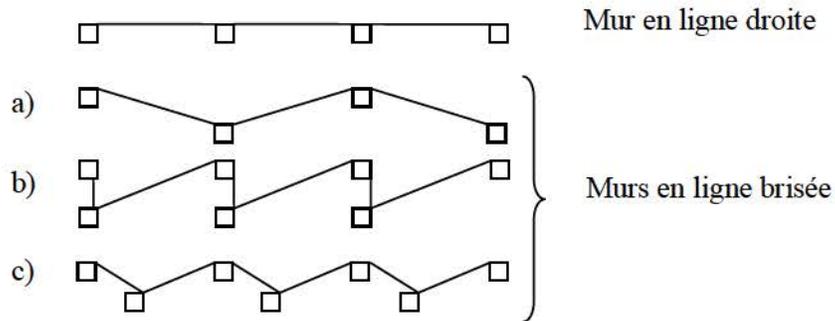


Figure 6 : Mur en ligne droite versus murs en ligne brisée

3 INVENTAIRE DES DIFFÉRENTS TYPES DE MURS VERTICAUX

Tableau 3 : Inventaire des différents types de murs verticaux

Types de mur	Emplacement conseillé	Types de construction	Avantages et inconvénients
Murs réfléchissants :  Connecticut D.O.T.	Mur seulement d'un côté de la route Aucune zone sensible en face côté résidents	Bois : Planches jointées disposées verticalement ou horizontalement Structure avec pieux porteurs, espacement variant de 2 à 6m Hauteur max 6 à 8m Épaisseur des planches minimum de 25 mm (rigidité des panneaux) Possibilité de panneaux préfabriqués enfichables dans montants métalliques Béton : Panneaux préfabriqués enfichés dans des montants métalliques (H beam)	+ prix, + aspect naturel ; + panneaux légers, fondations simples + pour panneaux préfabriqués, possibilité de différents motifs (moins sensibles aux graffitis) - sensible aux graffitis - longévité si mal traité, changement de couleur - nécessite un excellent drainage du pied + prix + différents finis disponibles + motifs en reliefs possibles + longévité - sensible aux graffitis, sauf si motifs

 <p>http://www.kaysersberg-plastics.com</p>		<p>Hauteur max : 10-12m Épaisseur minimum des panneaux 50mm Blocs de ciment Blocs de ciment 8" x 16" Hauteur jusqu'à 12m Fondation continue</p> <p>Panneaux de tôle Panneaux préfabriqués 2 faces de tôle et séparées par une mousse ou une laine acoustique Cadre en acier galvanisé Épaisseur typique du panneau 50 à 100 mm Hauteur max : 8-10m panneaux enfichables.</p> <p>Murs transparents (polycarbonate ou verre) Généralement, panneaux modulaires. Utilisés de manière à dégager la vue à partir de la route. Souvent utilisés sur des ponts. Dans ce cas, les panneaux sont courbés ou inclinés vers la route afin d'éviter les réflexions multiples sur les parois. Permettent d'alléger la vue d'ensemble de l'ouvrage tout en maintenant les capacités acoustiques. Les panneaux peuvent être utilisés conjointement avec d'autres matériaux afin de libérer par une fenêtre visuelle sur un point d'intérêt.</p>	<p>en reliefs prononcés - structure plus lourde que le bois ou la tôle, nécessite des fondations plus larges + longévité + coût d'entretien faible - coût d'installation élevé (fondation continue) - sensible aux graffitis</p> <p>+ légèreté + coût d'installation faible + couleurs disponibles très nombreuses - longévité - coûts d'entretien élevés</p> <p>+ esthétique + combinable avec d'autres types de panneaux modulaires - légèreté - coût d'achat - entretien - vieillissement des panneaux qui peuvent devenir opaques.</p>
--	--	---	--

<p>Murs absorbants</p>  <p>http://www.tertu.com</p>	<p>Cas de 2 murs se faisant face ; 1 seul mur avec zone sensible de l'autre côté de la voie de circulation</p> <p>Dans tous les cas, seule la face donnant sur la voie de circulation doit être traitée. Le côté du mur donnant sur les résidences ne doit pas être traité</p>	<p>Murs de bois Panneaux préfabriqués Composition du sandwich : Face résidant en bois (voir mur réfléchissant) Noyau central en matériau absorbant (fibre de verre ou fibre minérale) Film de protection étanche Surface de protection en bois (treillis etc.) ayant un pourcentage d'ouverture minimum de 40% Idéalement, les éléments du treillis de bois protecteur ne présentent pas de face verticale afin de favoriser les réflexions sur le matériau absorbant Cadrage de bois ou métal entourant le sandwich Protection étanche sur le dessus des panneaux Système enfichable dans des montants verticaux (H beam)</p> <p>Murs de béton Panneaux préfabriqués Face côté route recouverte d'un béton absorbant (poreux) minimum 1.5 " d'épaisseur Montants verticaux en métal ou béton avec rainure verticale pour faire glisser les panneaux Système d'accroche des panneaux</p> <p>Murs de tôle Panneaux préfabriqués</p>	<p>+ Esthétique + prix + plusieurs motifs possibles - coût d'entretien</p> <p>+ Facile d'installation + longévité + Possibilité de motifs moulés variés - difficile à nettoyer après graffitis - coût élevé</p> <p>+ variété de couleur ; + Système léger, donc fondations</p>
--	--	--	--

 <p>http://www.miceacousti c.com</p>	<p>Tôle arrière pleine Laine minérale ensachée Tôle perforée 40% côté route</p>	<p>moindres - coûts d'achat et d'entretien élevés - très sensible aux graffitis</p>
---	---	---

4 CRITÈRES DE DESIGN APPLIQUÉS AU PROJET DE LA ROUTE 116 À ST-HUBERT

4.1 Identification des configurations possibles

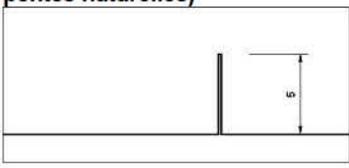
La première étape consiste à recenser les différents critères esthétiques et d'acceptabilité applicables au projet de la route 116 à St Hubert. Suite à ce recensement, la CPEUM a dressé un tableau présentant les différents concepts analysés et les raisons pour lesquelles certains d'entre eux ont été acceptés ou refusés.

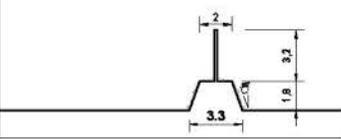
On reprend ici ce tableau en rajoutant 2 colonnes concernant les aspects acoustiques et structuraux.

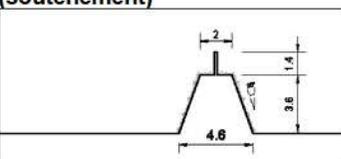
Les 3 premières colonnes du tableau sont directement extraites du rapport de la CPEUM.

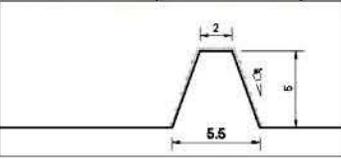
Dans le cas de la route 116 à St-Hubert, la largeur d'emprise exploitable moyenne est de 7 m. toutes les configurations ont été analysées en fonction de cette largeur d'emprise. Vu la faible largeur d'emprise disponible, le drainage des eaux de ruissèlement côté autoroute est supposé être effectué par des conduites souterraines.

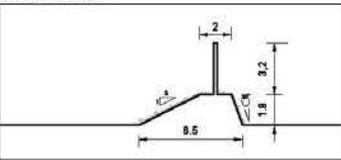
Tableau 4 : Liste des concepts possibles pour le projet de la route 116 à St-Hubert

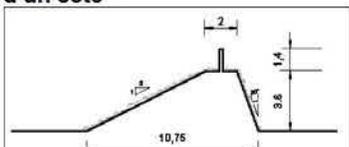
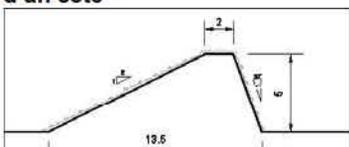
Options	Critères examinés	Option retenue ou rejetée	Aspect acoustique	Aspect structural
<p>a. Mur seul (ou avec buttes de pentes naturelles)</p> 	<p>Espace disponible Possibilité de végétaliser et de prévoir des usages complémentaires dans l'espace disponible</p>	<p>Retenue (voir systèmes 1 et 3)</p>	<p>Système efficace Possibilité de traitement acoustique côté route.</p>	<p>Calcul des semelles en fonction du type de sol</p>
<p>b. Butte-mur 1/3- 2/3</p>	<p>Espace</p>	<p>Rejetée</p>	<p>Système</p>	<p>Charge au</p>

<p>(soutènement : pente 70%)</p> 	<p>disponible</p>	<p>(l'espace disponible permet de ne pas utiliser un système de soutènement des deux côtés, or un tel système est plus coûteux à réaliser qu'une pente naturelle)</p>	<p>efficace Possibilité de traitement acoustique côté route</p>	<p>sol moyenne, Préparation des sols au pied de la butte avec drainage Forage nécessaire</p>
---	-------------------	---	---	--

<p>c. Butte-mur 2/3-1/3 (soutènement)</p> 	<p>Espace disponible Esthétique</p>	<p>Rejetée (effet trop massif d'une butte si haute, et l'écran disparaît presque complètement)</p>	<p>Système efficace lorsqu'utilisé seul Attention aux zones sensibles de l'autre côté de la route</p>	<p>Charge au sol très importante. Validation de la résistance du sol à la charge imposée. Préparation des sols au pied de la butte avec drainage Forage nécessaire</p>
--	---	--	---	--

<p>d. Butte seule (soutènement)</p> 	<p>Espace disponible Esthétique</p>	<p>Rejetée (effet trop massif d'une butte si haute : impact négatif similaire à celui d'un mur seul)</p>	<p>Système efficace lorsqu'utilisé seul Attention aux zones sensibles de l'autre côté de la route</p>	<p>Charge au sol très importante. Validation de la résistance du sol à la charge imposée. Préparation des sols au pied de la butte avec drainage Forage nécessaire</p>
--	---	--	---	--

<p>e. Butte 1/3-2/3 soutènement d'un côté</p> 	<p>Espace disponible</p>	<p>Retenue et adaptée (voir système 2)</p>	<p>Système efficace Possibilité de traitement acoustique côté route</p>	<p>Charge au sol moyenne, Préparation des sols au pied de la butte avec drainage Forage nécessaire</p>
<p>f. Butte 1/3-2/3 soutènement</p>	<p>Espace</p>	<p>Rejetée</p>	<p>Système</p>	<p>Charge au</p>

<p>d'un côté</p> 	<i>disponible</i>		efficace	sol importante
<p>g. Butte seule soutènement d'un côté</p> 	<i>Espace disponible</i>	<i>Rejetée</i>	Système efficace, s'apparente à une butte	Charge au sol importante

Sur les 7 configurations analysées, seules 3 ont été retenues par la CPEUM. Toutes les configurations utilisant des buttes de forte pente et de grande hauteur ont été rejetées sur la base de critères esthétiques. Les buttes mixtes, composées d'une pente 2 pour 1 et d'une pente à 70 degrés ont été rejetées en raison du manque d'espace disponible. Le côté à forte pente va également présenter un aspect imposant incompatible avec les critères esthétiques.

D'un point de vue acoustique, les configurations de buttes à forte pente sont efficaces. Toutefois, l'absorption acoustique de ces pentes sera négligeable, mais elle sera compensée par l'effet de pente. Le fait que le sommet de la butte présente toujours une surface horizontale importante sur son sommet (2m) permet de limiter fortement les phénomènes de diffraction acoustique en moyennes et hautes fréquences. Dans le cas de 2 buttes face à face, le traitement acoustique des parois est donc moins important. Si une zone sensible se trouve en face de la route, il faudra évaluer l'impact acoustique de la butte dans cette zone.

D'un point de vue structural, l'utilisation de buttes à forte pente et de grande hauteur n'est possible que dans le cas où la capacité portante du sol est excellente. Pour des sols de moindre portance, cette configuration présente de forts risques ou nécessite l'emploi de remblais plus légers, pouvant rendre la solution inacceptable en terme de coûts.

4.2 Analyse des configurations retenues :

Le recensement des configurations disponibles permet d'identifier 2 configurations possibles. Ces configurations sont :

- a) mur seul
- b) butte 1/3 2/3 avec forte pente d'un seul côté.

Le choix des configurations possibles a été effectué sur une base où la route se situe au même niveau que les résidences. Dans le cas considéré ici, la route 116 est environ 1 m plus haute que la rue avoisinante. La CPEUM a donc conçu des variantes des concepts retenus tenant compte de cette déclivité. Ces concepts intègrent les éléments essentiels des cahiers des charges acoustique et structurel du mur. Finalement, ces 2 configurations sont adaptées au site. Cette adaptation permet l'utilisation sur 3 concepts différents.

4.3 Concept 1 : mur seul

La figure suivante montre l'utilisation d'un mur seul construit dans l'emprise disponible de 7 mètres de largeur.

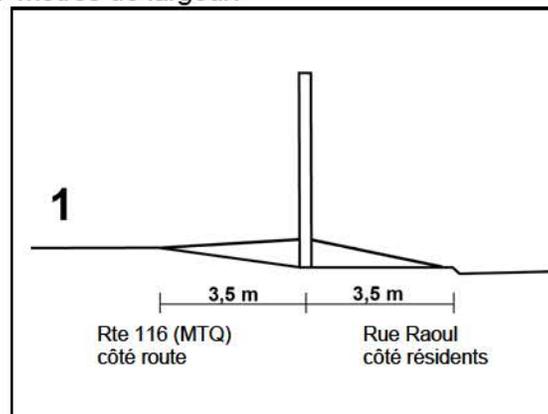


Figure 7 : Mur de 5 mètres de haut situé au centre de l'emprise (source CPEUM).

Dans cette configuration, on utilise un mur simple de 4,5 mètres de hauteur par rapport au niveau de la route 116. Le mur est intégré dans un remblai de faible hauteur (environ 50 cm côté autoroute et entre 1 et 1,5 m côté rue). Un ajout de terre végétale a été effectué afin d'obtenir la pente nécessaire à l'écoulement des eaux côté autoroute. Dans ce cas, le drainage côté autoroute doit être effectué par l'intermédiaire de conduites souterraines. Le sous-bassement du mur doit être enterré dans une couche de gravier parfaitement drainée afin d'éviter le pourrissement ou la corrosion des matériaux constitutifs du mur.

Le drainage est également essentiel à la croissance des végétaux côté autoroute, afin d'éviter les accumulations de dépôts salins. Il est important de noter que le mur aura tendance à confiner les projections salines du côté autoroute. L'implantation de végétaux en avant du mur ne pourra être effectuée que si le drainage est parfait. Cette configuration peut également

être utilisée pour des emprises moins larges. Elle constitue donc un élément de transition intéressant, notamment proche des voies d'accès à l'autoroute.

4.4 Concept 2 : butte combinée

La figure suivante montre l'utilisation d'un système mixte butte faible pente côté autoroute et butte forte pente avec zone de végétalisation côté résidants.

Dans ce cas, la partie verticale du mur ne sera plus que d'environ 4m. La distance hors gel par rapport au sol original ne sera plus que de 1m, ce qui réduira les coûts de forage des fondations.

La pente plus importante côté autoroute va favoriser l'écoulement des eaux vers le système de drainage souterrain, et donc favoriser le lessivage des résidus des sels de déglacage.

L'épaisseur de terre végétale disponible permettra une meilleure acclimatation des plantes, et donc élargira le choix des végétaux possibles. Côté résidants, l'épaisseur de sol disponible pourra permettre la croissance de végétaux de plus grande ampleur. Ici aussi, la base du mur devra être insérée dans un remblai de gravier parfaitement drainé afin d'éviter le pourrissement des matériaux. On devra s'assurer que le système racinaire des végétaux implantés ne vienne abîmer la base du mur.

Cette solution présente des avantages importants, tant en terme de végétalisation de l'ouvrage qu'en terme de structure puisque la hauteur de remblai.

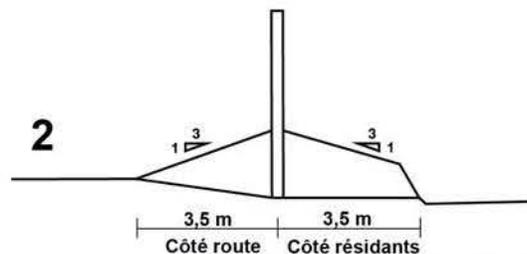


Figure 8 : système mixte butte faible pente côté autoroute et butte forte pente avec zone de végétalisation côté résidants (source CPEUM)

4.5 Concept 3 : mur sur butte avec espaces riverains maximisés:

Le concept 3 proposé par la CPEUM permet de dégager côté résidants un nouvel espace fonctionnel. Cet espace peut par exemple être utilisé pour la création d'une piste cyclable.

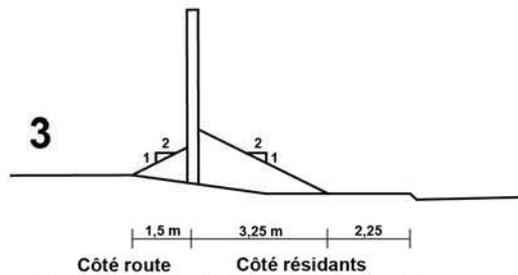


Figure 9 : Mur proche de l'autoroute pour maximiser l'espace côté citoyen (source CPEUM)

Dans le cas du concept 3 proposé par la CPEUM, l'ingénieur de structure devra modifier légèrement le principe en proposant une zone plane à proximité du mur. Cette zone permettra d'égaliser les contraintes exercées de part et d'autre de la structure. L'influence sur l'esthétique globale du mur vu côté résidences sera négligeable.

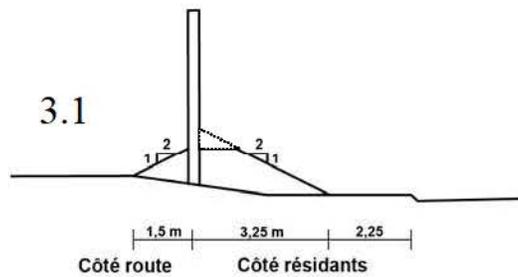


Figure 10 : Mur proche de l'autoroute pour maximiser l'espace côté citoyens : rectification structurale

5 CONCEPTION D'UN MUR VERTICAL LÉGER

5.1 Systèmes existants

Les trois principaux rôles d'un mur acoustique sont :

- bloquer le son (perte par transmission du mur)
- être suffisamment haut pour masquer les sources et limiter les phénomènes de diffraction
- éventuellement, absorber les sons côté route afin d'éviter qu'ils ne puissent être réfléchis vers des zones sensibles.

Dans notre cas, on basera l'étude sur la conception d'un mur de 5 m de haut (16').

Nous avons vu qu'il existe différents types de mur :

- les murs à structure continue, construits sur une fondation linéaire ;
- les murs modulaires, constitués de panneaux enfichés ou fixés à des montants verticaux.

La seconde est la plus couramment utilisée. Elle nécessite un système de fondation moins coûteux que celui des murs continus et est donc moins cher à l'installation. Le caractère modulaire du mur présente entre autre comme avantage une grande facilité d'installation et un choix possible de matériaux et de finis pour la surface du mur très important.

Les matériaux les plus couramment utilisés pour ces murs sont le bois, le métal, le béton ou le verre et le polycarbonate.

Nous regarderons dans cette section les murs modulaires 'légers' tels que trouvés dans la littérature.

5.1.1 Murs en planches jointives non-absorbantes

La photo suivante montre un mur de bois constitué de planches jointées. Ce système est développé par le 'Connecticut Département of Transportation'.



Figure 11: Écran routier en bois (photo Connecticut D.O.T), 2006

La hauteur maximale d'un tel mur est de 22', c'est-à-dire 6,6 mètres. Les parois du mur sont constituées de planches emboutées sur le long et assemblées l'une sur l'autre. L'épaisseur des planches est de 1.½", soit 3.8 cm. L'emboutage des planches permet de s'assurer de l'étanchéité du système entre chaque planche.

Les planches sont clouées sur des montants de bois de type 'pieux de téléphone'. Le clouage des planches se fait de part et d'autre du pieu afin de donner un aspect de déclin dans le sens de la route.

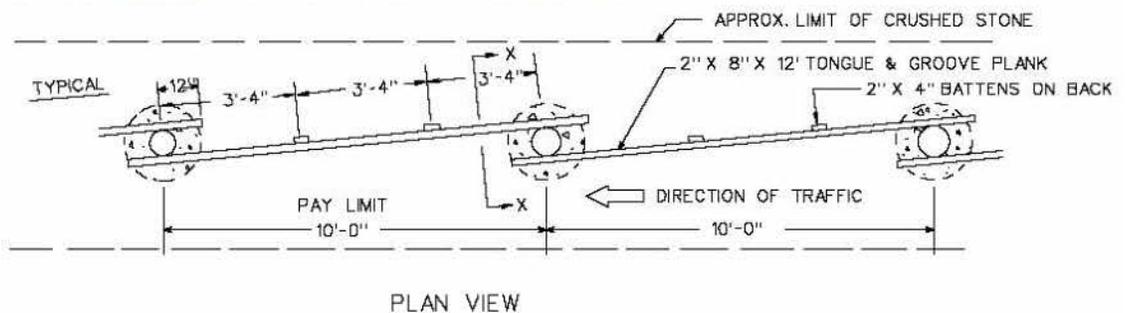


Figure 12 : vue de plan du mur de bois développé par le Connecticut D.O.T.

La base du mur est insérée dans un lit de gravier, s'étendant d'environ 30 cm de part et d'autre du mur d'une épaisseur moyenne de 25 cm. Ceci permet d'une part de s'assurer de l'étanchéité acoustique de la base du mur et d'autre part de s'assurer que la planche du bas soit insérée dans une section de sol bien drainée afin d'éviter son pourrissement.

Pour un mur de 5m de haut, le Connecticut D.O.T. propose une fondation constituée de pieux de béton de 60 cm de diamètre, enfoncés à 2.1 mètre

dans le cas d'un mur installé sur une surface plane. Si le mur est installé au sommet d'un remblai ayant une pente de 2 pour 1, la profondeur de la fondation doit être d'environ 3 mètres.

La méthode de fixation des planches par clouage sur le pieu en bois permet de compenser la précision des forages des embases des pieux.

5.1.2 Murs de tôle avec ou sans propriétés absorbantes

Ces écrans sont constitués de panneaux modulaires ayant généralement une longueur de 4 à 5 mètres. Au Québec, les panneaux de tôle sont disponibles entre autre sous le nom de 'Criteria'. Ces panneaux sont constitués de caissons métalliques (acier galvanisé) de 120" de long, sur 24" de haut et de 2" à 4" d'épaisseur. L'intérieur des caissons est rempli de laine minérale.

Il est possible de remplacer l'une des faces du caisson par une tôle perforée afin de lui conférer des propriétés absorbantes côté route. Dans ce cas, la laine minérale doit être protégée par un film mince de Mylar

Le montage des panneaux est effectué en glissant les caissons les uns par-dessus les autres à l'intérieur de montants métalliques en H. La figure suivante montre le montage d'un tel mur.

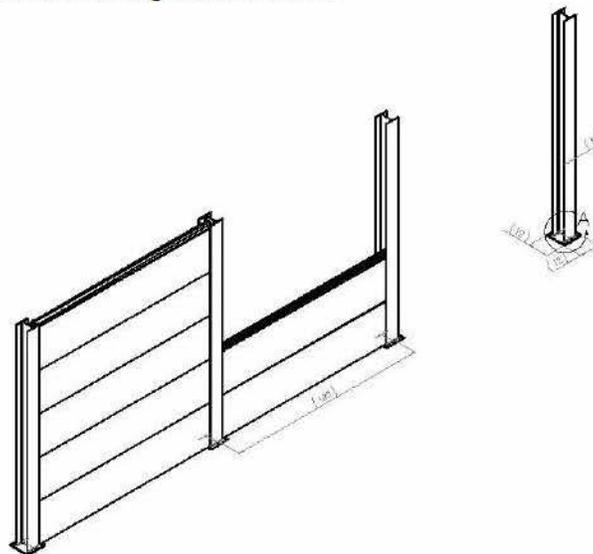


Figure 13 : Montage des caissons à l'intérieur des montants (source : www.acoustock.com).

Sur la figure 14, on montre un arrangement de murs de panneaux métalliques créant une discontinuité dans le système. Dans ce cas, chaque section est installée indépendamment des autres entre 2 montants en U. Le recouvrement entre les sections et le revêtement absorbant permet de limiter l'effet des discontinuités, et donc de garder l'efficacité globale de l'écran. Par contre, cette solution sera plus coûteuse et nécessitera le doublement des montants de support.



Figure 14: Écran acoustique monté avec recouvrement (Écran AU069 (source : Mince protection acoustique))

La figure 15 montre une vue en coupe d'un écran acoustique absorbant en tôle. La face exposée au bruit (côté route) est composée d'une tôle perforée en acier galvanisée. Un film étanche mince vient ensuite protéger la couche de laine minérale contre les intempéries. Selon les performances acoustiques demandées, l'épaisseur de laine minérale peut varier de 2 à 4".

Les caractéristiques acoustiques d'un d'écran de 4" sont données par le tableau suivant :

Tableau 5 : Propriétés acoustiques d'un écran Critéria de 4" (Source www.acoustock.com)

	Fréquences centrales de la bande (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	
Coefficient d'absorption	0.80	1.13	1.15	1.09	1.07	1.04	NRC 1.1
Perte par transmission (TL) dB	22	28	40	48	57	60	STC 41

La perte par transmission de l'écran correspond à un indice STC de 41 (sound Transmission Class selon la norme ASTM E413).

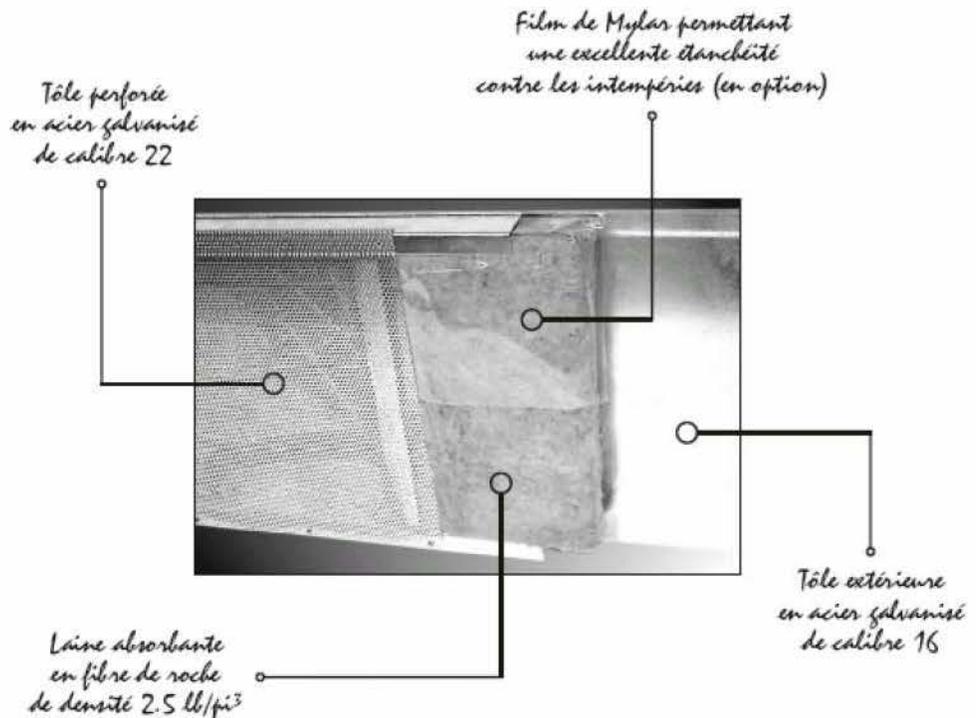


Figure 15 : Vue en coupe d'un écran acoustique Criteria (www.acoustock.com)

Généralement, ces écrans sont installés sur une fondation en béton linéaire. Toutefois, le concept peut être adapté à des fondations sur pieux, mais il nécessite un placement très précis des pieux de fondation.

5.1.3 Mur de bois avec absorbant acoustique (écrans ECIB)

On présente ici un concept de mur de bois ayant des propriétés acoustiques absorbantes (écran en bois absorbant ECIB, <http://www.ecib-bruit.com>).

Les caissons ont une hauteur de 50 cm et une largeur de 12 cm. Ils peuvent être superposés et former un mur de plus de 3m de haut. Selon le fabricant, ce système est généralement posé sur une semelle de béton linéaire. Leur installation est donc plus coûteuse que celle des écrans de bois à planche jointive de type Connecticut DOT.

La partie de l'écran faisant face à la route est constituée de clins de bois fixés sur un cadrage de bois. La laine minérale est protégée en surface par un mince film imperméable (pvf 21 μ m). La face côté résidant est constituée d'un assemblage de planches jointées.

Les performances acoustiques de ce mur permettent d'obtenir un indice STC de 37 dB.

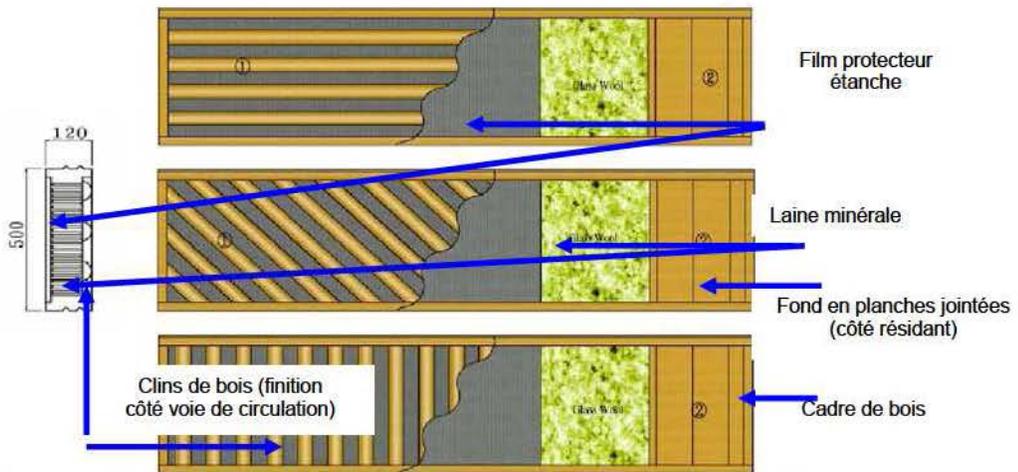


Figure 16 : Vue éclatée d'un panneau de bois absorbant (source www.ecib-bruit.com)

5.2 PROPOSITION D'UN CONCEPT LÉGER ET ÉCONOMIQUE D'ÉAV

On propose ici de tracer les grandes lignes d'un concept de mur antibruit en bois pouvant s'avérer être une alternative économique aux murs existants.

Le nouveau concept doit :

- pouvoir être décliné en version avec ou sans face absorbante
- avoir un aspect extérieur pouvant s'intégrer au mur végétal
- utiliser des matériaux à faible coût

Pour ceci, nous suggérons d'utiliser un mur constitué d'une âme en contreplaqué insérée dans un cadrage de bois ou de métal.

La face côté rue devrait être constituée de clins de bois équivalents à ceux utilisés par Ecib. La laine minérale utilisée dans le cas des panneaux absorbants devrait être protégée en surface par un mince film étanche (Mylar, Kapton, PVF, etc.).

Côté rue, le panneau de contreplaqué pourrait être habillé de clins de bois afin de créer différentes sortes de motifs. De plus, les clins vont renforcer le comportement mécanique du panneau. L'utilisation d'un contreplaqué de grade 'marine' permet de s'assurer d'une relativement bonne tenue du matériau en contexte extérieur. Toutefois, un traitement de surface devra être effectué afin d'assurer la longévité du panneau. Le traitement de surface le plus classiquement utilisé constitue en une épaisse couche de peinture goudronnée résistant à la fois aux rayonnements ultraviolets et à l'humidité. Des vernis de surface peuvent également être appliqués. Dans tous les cas, le traitement proposé devra faire l'objet de tests spécifiques dans le contexte d'un climat nordique tel que le nôtre.

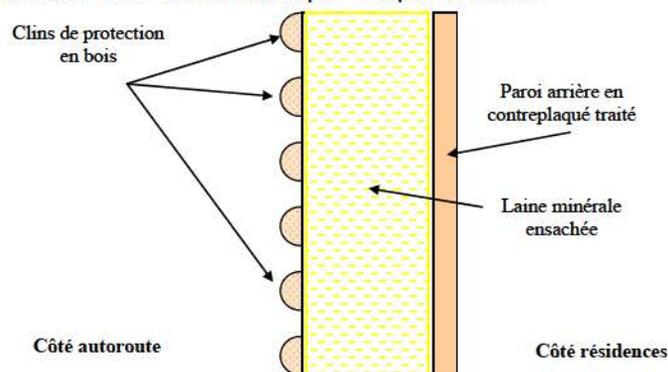


Figure 17 : Vue en coupe du concept proposé

5.3 Calcul des propriétés acoustiques du mur :

5.3.1 Méthodologie

Les propriétés acoustiques du mur sont calculées à l'aide du logiciel NOVA développé au GAUS. Ce logiciel permet de calculer l'absorption acoustique et la perte par transmission de parois multicouches. Dans notre cas, le concept simulé est constitué de 3 couches. Ces couches sont, en partant de la route :

- un film de protection étanche
- une couche épaisse de laine minérale
- un panneau de contreplaqué 'marine'.

Le contreplaqué 'marine' est résistant à l'humidité. Par contre sa résistance aux rayonnements ultraviolets nous est inconnue. Un traitement de surface résistant aux U.V. serait à valider. Les propriétés acoustiques du contreplaqué 'marine' ne sont pas connues. On procède donc lors d'une première étape à la caractérisation d'une feuille de contreplaqué 'marine' via des mesures de perte par transmission dans les installations du GAUS. Les caractéristiques des autres matériaux constitutifs sont connues et validées. On utilisera donc les données contenues dans la banque de matériaux du logiciel NOVA.

5.3.2 Caractérisation d'un panneau de contreplaqué 'marine'

Ces mesures sont effectuées dans le laboratoire de perte par transmission du GAUS selon la norme ISO 15186-1: 2000.

Le laboratoire est constitué d'une chambre réverbérante, servant de local source, couplée à une chambre anéchoïque, servant de local récepteur.

La perte par transmission du panneau est caractérisée par le rapport de l'énergie acoustique incidente sur l'énergie transmise. Elle est exprimée en dB.

L'énergie acoustique incidente est calculée à partir du niveau de pression moyen dans la chambre réverbérante.

L'énergie acoustique transmise est calculée via la mesure du niveau d'intensité acoustique émis dans le local récepteur par le panneau. Le niveau d'intensité émis est mesuré à l'aide d'une sonde d'intensité sur un maillage de 96 points couvrant la surface du panneau. Un système robotisé permet de déplacer précisément la sonde d'un point à l'autre.

La chambre réverbérante est insonorisée à l'aide de 6 haut-parleurs permettant d'obtenir un spectre d'excitation de type bruit rose. Le niveau de bruit dans la chambre réverbérante est de 127 dB(A).

La figure suivante montre une vue de la chambre réverbérante. On peut voir sur cette photo le bras rotatif permettant de mesurer le niveau de bruit moyen dans le local, les quatre sources hautes fréquences ainsi que les diffuseurs destinés à homogénéiser le champ acoustique.



Figure 18 : Vue de la chambre réverbérante (local source)

Les 2 images suivantes montrent le panneau installé dans le mur de perte par transmission (côté local récepteur) ainsi qu'une vue d'ensemble de la chambre semi-anéchoïque.



Figure 19 : Panneau de contreplaqué, vu côté local récepteur (gauche) et vue de la chambre semi-anéchoïque (droite)

La figure 19 montre la comparaison calcul – mesure sur le panneau de contreplaqué seul. On observe que le calcul permet de bien suivre la tendance de la mesure. Les écarts en basse fréquence s'expliquent du fait que le calcul ne tient pas compte des effets de conditions aux limites sur le panneau.

La chute de la perte par transmission du panneau à 2 kHz est due au phénomène dit de fréquence de coïncidence. À cette fréquence, la célérité des ondes de flexion dans le panneau est égale à celle des ondes acoustiques dans l'air. Ceci entraîne un couplage parfait entre les vibrations du panneau et les ondes acoustiques. Le modèle parvient bien à simuler ce phénomène, mais par contre il l'amplifie. Ceci est

essentiellement dû au fait que le panneau de contreplaqué est composé de plusieurs couches collées ensemble. Lors de la modélisation, on considère que le panneau est homogène, alors qu'en réalité il est composé de plusieurs couches de bois collées ensemble. On sous-estime ici l'amortissement du panneau autour de la fréquence critique. Ce comportement se retrouve souvent pour des panneaux constitués de plusieurs couches collées.

La sous-estimation de la perte par transmission à la fréquence critique est particulièrement sensible au niveau du calcul du STC. Ce calcul fait intervenir un gabarit normalisé qu'on fait 'glisser' de bas en haut sur la courbe de perte par transmission jusqu'à ce que la courbe atteigne le niveau moyen de la courbe de perte par transmission du matériau. On voit figure 19 que la courbe du contour STC 28 est presque toujours sous la courbe mesurée pour le panneau mesuré, sauf à la fréquence critique. C'est le phénomène de fréquence critique qui est pénalisant dans le calcul du STC.

La similitude des allures des courbes de perte par transmission mesurées et simulées nous permet toutefois de dire que le modèle représente bien la réalité, même s'il l'a sous-estimé légèrement vers 2 kHz.

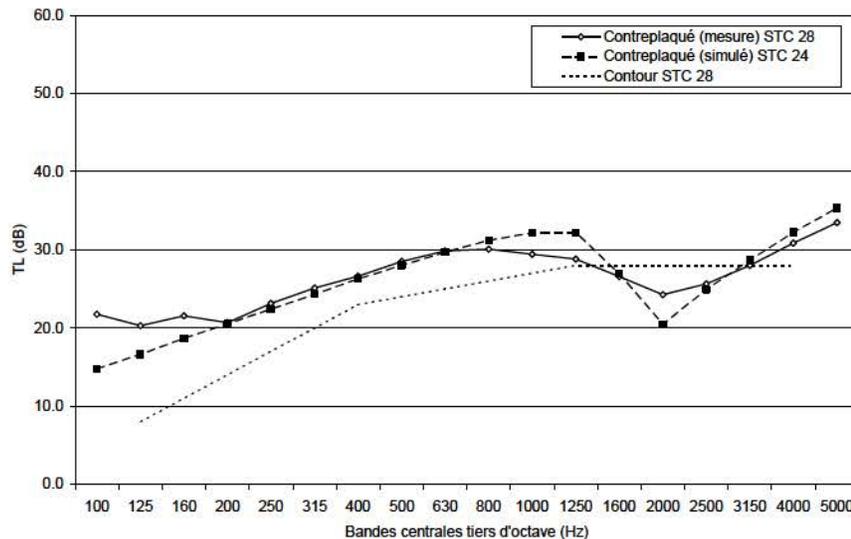


Figure 20 : Perte par transmission mesurée et calculée pour un panneau de contreplaqué type 'marine'

5.3.3 Modélisation du panneau assemblé

Effets sur l'absorption acoustique :

L'absorption acoustique est essentiellement gouvernée par le matériau exposé au côté route de l'écran. On montre ici l'effet sur l'absorption acoustique de l'épaisseur du matériau.

On remarque que dans tous les cas, l'absorption acoustique est très faible en basses fréquences. L'effet de l'épaisseur se fera surtout sentir en moyennes fréquences. Dans le cas d'une laine de 4" d'épaisseur (10 cm), le maximum d'absorption est atteint vers 500 Hz. Si l'épaisseur est ramenée à 2" (5cm), le maximum se situe vers 1 kHz, et à 1" (2.5 cm), le maximum est à 1250 Hz.

L'augmentation de l'absorption avec la fréquence et avec l'épaisseur du matériau est un comportement général qu'on retrouvera sur l'ensemble des matériaux poreux.

On remarque sur les courbes présentées ici que l'absorption diminue en hautes fréquences. Ceci provient de l'effet du film protecteur.

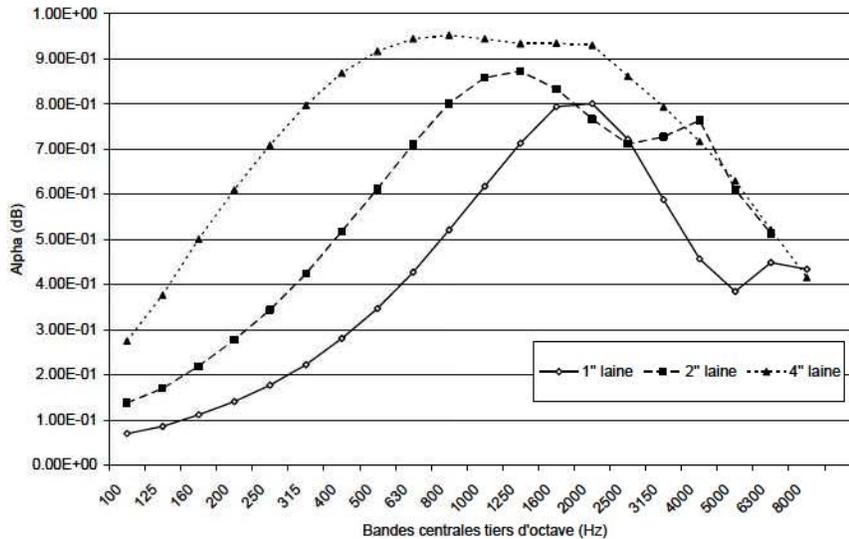


Figure 21 Effet de l'épaisseur du film protecteur sur l'absorption acoustique

Le film protecteur a pour objet d'éviter que le matériau fibreux inclus dans le panneau soit exposé directement aux intempéries.

On calcule ici l'influence de l'épaisseur du film sur le coefficient d'absorption du panneau. Les calculs sont effectués pour un film de PVC. On obtiendra des résultats équivalents pour d'autres types de films.

En l'absence de film, le coefficient d'absorption augmente graduellement en fonction de la fréquence pour tendre vers la valeur maximale de 1. Lorsqu'on rajoute un film de faible épaisseur, le coefficient d'absorption commence à chuter en hautes fréquences. Par contre, on remarque une légère amélioration des performances du système en basses fréquences. Lorsqu'on augmente l'épaisseur du film, l'absorption en hautes fréquences chute considérablement. En basses fréquences, on observe l'apparition d'un pic d'absorption de plus en plus sélectif lorsque l'épaisseur du film augmente.

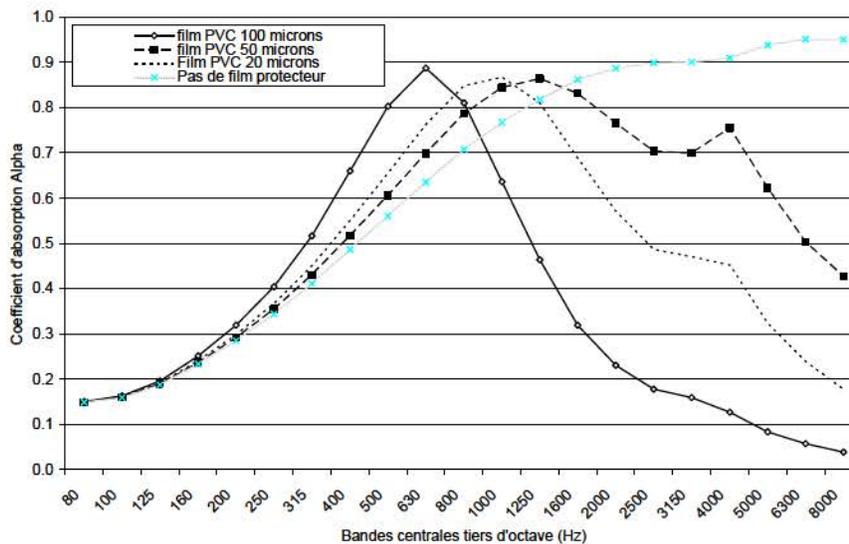


Figure 22: Effet de l'épaisseur du film protecteur sur l'absorption acoustique

Effet de l'épaisseur de la couche de contreplaqué

La figure suivante montre les pertes par transmission calculées dans le cas d'une feuille de contreplaqué seule et pour 2 épaisseurs différentes soit 5/8" et 1".

En basses fréquences et en hautes fréquences, les deux courbes sont parallèles. On observe un écart constant d'environ 4 dB, à l'avantage du panneau le plus épais. Par contre, la valeur de la fréquence critique du panneau diminue, ce qui est dû à la plus grande rigidité du panneau. Cette diminution de la fréquence critique va avoir des conséquences importantes pour STC du panneau de 1" d'épaisseur, qui ne sera que 1 dB supérieur à celui du panneau de 5/8".

Sur la figure 24, on montre l'effet sur la perte par transmission de l'assemblage complet. L'effet de la couche de laine est quasiment nul en basses fréquences. Il a tendance à augmenter avec la fréquence et permet d'obtenir un écart de près de 10 dB(A) en hautes fréquences. Cet effet en hautes fréquences se retrouve directement sur la valeur du STC du panneau, qui passe de 24 dB pour la feuille de contreplaqué nue, à 35 dB

pour la feuille recouverte de 2" de laine minérale et d'une pellicule de protection en PVC.

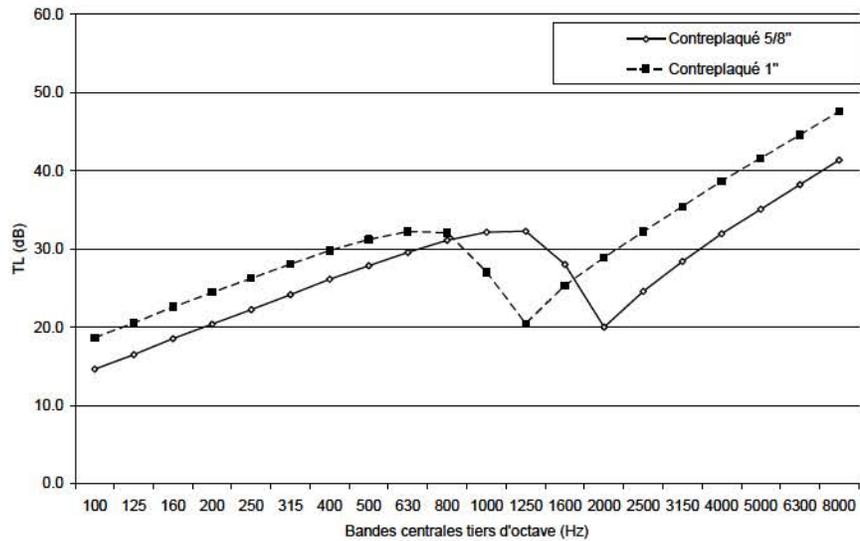


Figure 23 : Effet de l'épaisseur d'un panneau de contreplaqué seul sur la perte par transmission

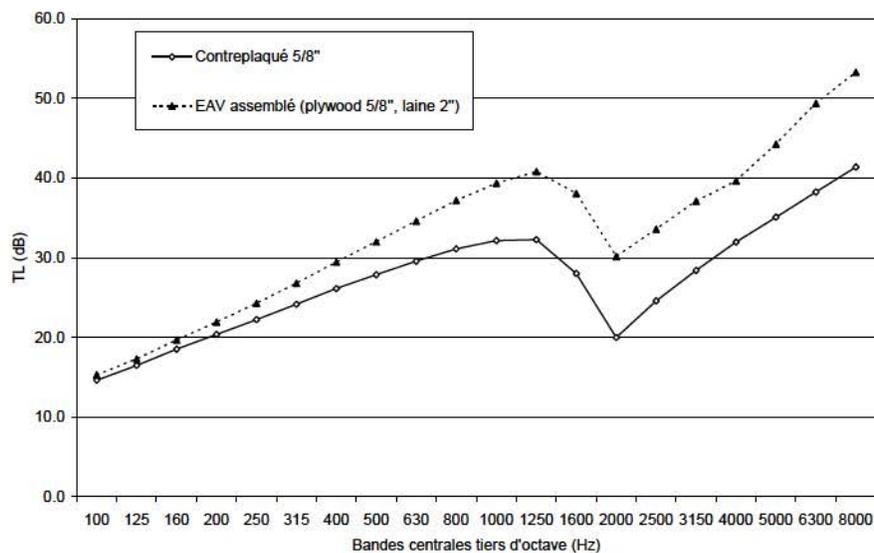


Figure 24 : Effet de l'assemblage complet sur la perte par transmission du mur

La mesure de perte par transmission d'un simple panneau de contreplaqué 'marine' donne un STC de 24 dB. En termes de perte par transmission, cette valeur est suffisante pour assurer l'efficacité du mur. Il est important de noter que l'efficacité du mur dépend en grande partie des phénomènes de diffraction, et non pas de sa perte par transmission.

5.4 Conception des fondations

La principale contrainte au Québec provient de la profondeur de gel. L'utilisation de fondations continues dans des pays moins nordiques permet d'ancrer le mur de façon efficace sur une fondation continue de faible hauteur. Dans notre cas, la fondation doit pouvoir reposer en-dessous de la zone de gel afin de s'assurer de sa longévité. Typiquement, on situe cette zone à environ 2 m.

L'utilisation de fondations sur pieux permet de diminuer les coûts d'excavation. Par contre, le positionnement des pieux doit être très précis (moins de 1/2") de manière à s'assurer que les panneaux modulaires viennent s'insérer adéquatement dans leurs montants. L'utilisation de scellant acoustique entre les montants et le panneau est nécessaire.

Le système proposé par le Connecticut D.O.T. permet de s'affranchir de la contrainte sur la précision du positionnement des pieux. Dans ce cas, les planches sont vissées sur le montant de bois, ce qui permet un jeu plus important.

L'utilisation de pieux vissés peut également être une alternative. Par contre, l'ingénieur responsable du projet devra calculer la longueur des murs de refend nécessaire pour s'assurer de la stabilité au vent de l'ouvrage. Le calcul devra tenir compte des capacités portantes du sol. D'éventuels tests de traction ou de compression devront donc être réalisés.

La base du mur doit être recouverte de pierres concassées afin d'éviter les fuites acoustiques et favoriser un bon drainage qui évitera le pourrissement du mur.

6 ABSORPTION ACOUSTIQUE DES SOLS

6.1 Généralités

Les caractéristiques demandées à un sol pour favoriser la croissance des végétaux (aération et drainage) s'apparentent aux caractéristiques physiques requises pour une bonne absorption acoustique.

On regarde ici quelles sont les propriétés acoustiques de différents types de sol classiquement utilisés dans des aménagements végétaux.

Les mesures sont effectuées sur les sols suivants :

- terreau végétal très aéré
- sol herbeux faiblement compacté
- sable
-

Finalement, on regarde l'effet de l'humidité sur les capacités d'absorption d'un sol constitué de terreau végétal.

6.2 Mesure d'absorption en tube de Kundt

6.2.1 Principe de la méthode

Les mesures d'absorption sont effectuées selon la méthode dite du tube d'impédance. Cette méthode permet de mesurer l'absorption acoustique d'un matériau sous incidence normale. La mesure et le traitement des données sont réalisés selon la norme ASTM-E 1050-86.

Le schéma suivant montre le principe de la mesure d'absorption en tube d'impédance.

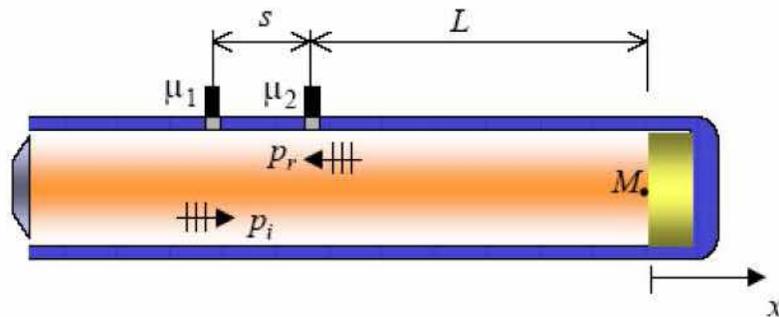


Figure 25 : Principe de fonctionnement du tube d'impédance

Le haut-parleur émet une onde plane acoustique large bande. Une fraction de l'onde acoustique est absorbée par l'échantillon tandis qu'une autre partie est réfléchie à l'intérieur du tube, formant ainsi un système d'ondes stationnaires. Le champ acoustique à l'intérieur du tube se décompose donc en une partie propagative, correspondant à la fraction de l'énergie acoustique absorbée par le matériau, et une partie stationnaire, correspondant aux réflexions sur l'échantillon.

La méthode de mesure utilisée, dite du doublet microphonique, permet de mesurer la partie propagative de l'onde, et donc d'estimer le coefficient de réflexion sur le matériau.

L'équation suivante est utilisée pour décrire le coefficient de réflexion du matériau à partir de la fonction de transfert mesurée entre les deux microphones.

$$\tilde{R} = \frac{e^{jks} - \tilde{H}_{12}}{\tilde{H}_{12} - e^{-jks}} e^{j2kL}$$

Le terme H12 est déterminé en mesurant la fonction de transfert entre les micros 1 et 2.

Le coefficient d'absorption du matériau peut être déterminé à partir du coefficient de réflexion via la formule suivante :

$$\alpha = 1 - |\tilde{R}|^2$$

Les mesures in-situ sont effectuées en enfonçant le tube dans la terre sur une profondeur d'environ 2". On s'assure de l'étanchéité des bords en ramenant du terreau sur les parois extérieures du tube. Dans tous les cas, on vérifie que la structure du sol n'a pas été modifiée en enfonçant le tube.

6.3 Mesure sur des échantillons de sol végétal

Les figures suivantes donnent le coefficient d'absorption des différents types de sols testés.

On rappelle ici qu'un coefficient de 1 signifie que le sol est très absorbant tandis qu'un coefficient de zéro signifie que le sol est réfléchissant.

Le premier type de sol testé est une zone sablonneuse. On pourrait penser que ce type de sol présentera de bonnes propriétés acoustiques du fait des espaces d'air libre entre les grains de sable. La figure 25 montre qu'en fait, le sable se comporte plutôt comme un matériau réfléchissant, avec une absorption maximum de l'ordre de 0.3 en hautes fréquences.

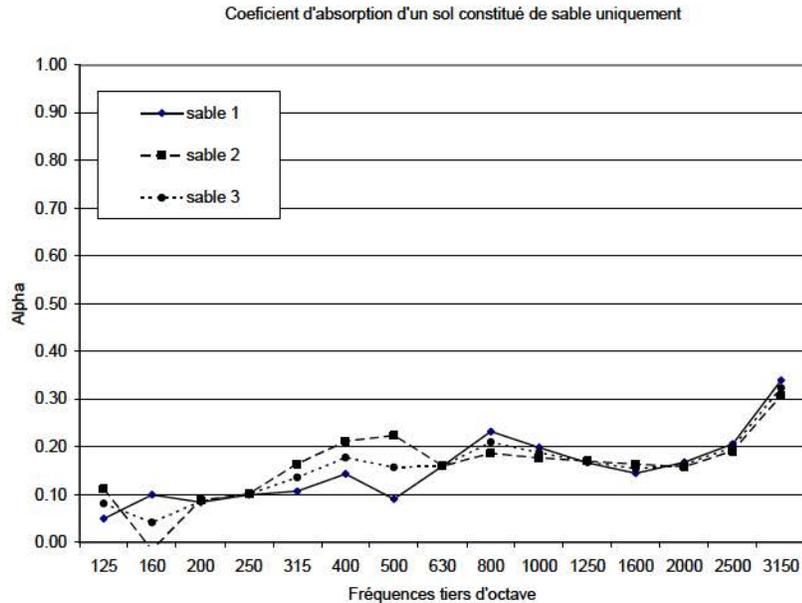


Figure 26 : Coefficient d'Absorption d'un sol en sable

La figure 26 montre le coefficient d'absorption d'un sol herbeux légèrement compacté. Là encore, l'absorption reste faible jusqu'à plus de 2 kHz. En plus hautes fréquences, elle tend en moyenne vers 0.5. Ce type de comportement est probablement similaire à celui observé sur les buttes à faible pente tel que recommandé par le ministère des transports du Québec dans le cas d'emprises larges. Dans tous les cas, ce type de sol ne peut être considéré que comme faiblement absorbant.

La figure 27 montre l'absorption mesurée dans une plate-bande recouverte de paillis végétal. On remarque une bonne répétitivité des essais, avec une absorption maximum de l'ordre de 0.5 atteinte aux alentours de 800 Hz. On peut donc s'attendre à de relativement bonnes valeurs d'absorption pour des aménagements paysagés utilisant un couvert de paillis. Par contre, ce type d'aménagement implique un entretien régulier au cours des années incompatible avec les contraintes imposées par le MTQ le long des voies de circulation.

De plus, l'utilisation de paillis implique des sols à très faible pente. Ils ne sont donc pas efficaces pour limiter les réflexions multiples sur des parois verticales ou presque verticales.

Coefficient d'absorption d'un sol constitué herbeux légèrement compacté

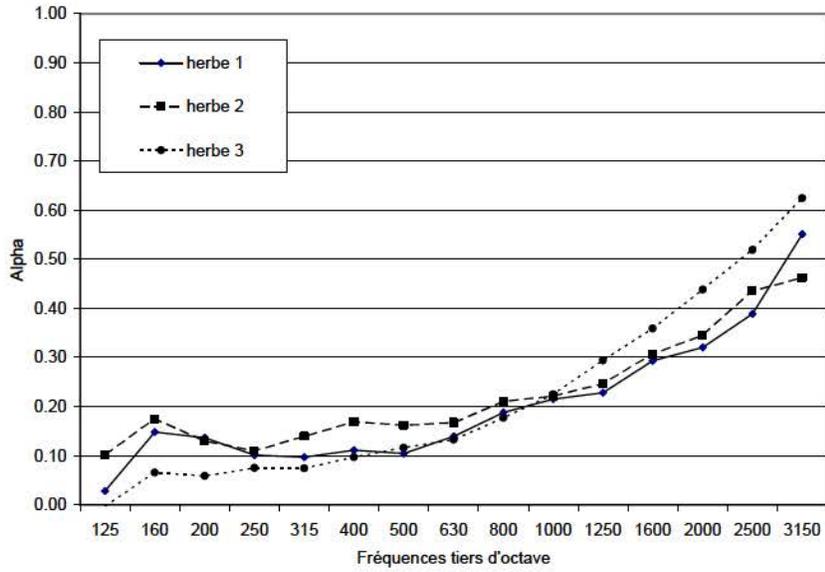


Figure 27: Coefficient d'absorption d'un sol herbeux légèrement compacté

Coefficient d'absorption d'une plate bande recouverte de paillis végétal

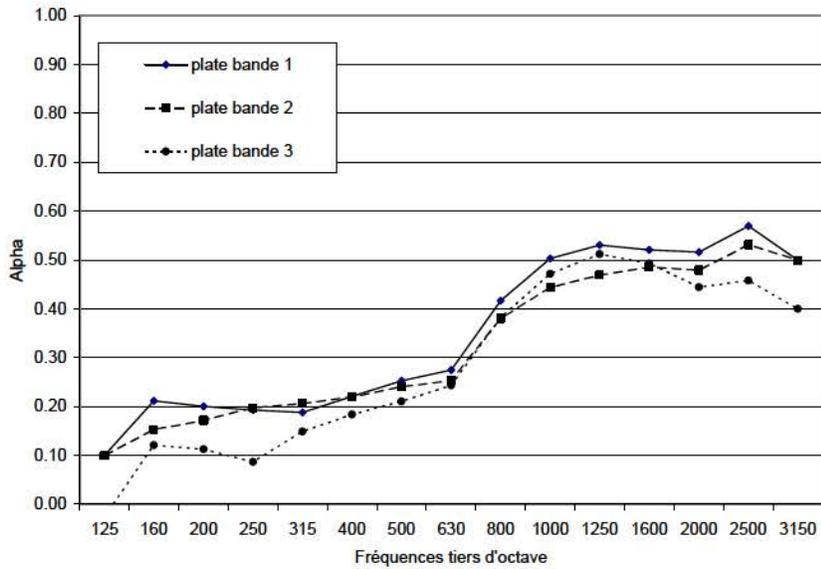


Figure 28 : Coefficient d'absorption d'une plate-bande recouverte de paillis végétal

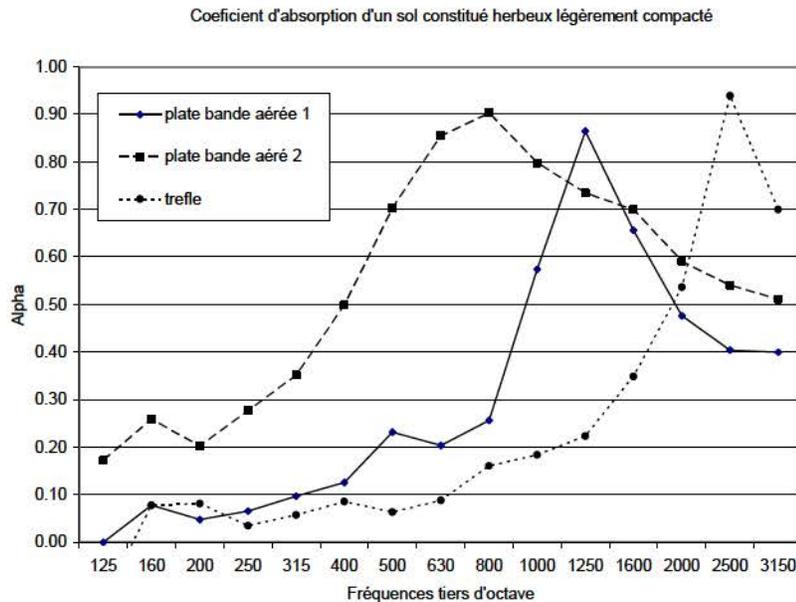


Figure 29 : Coefficient d'absorption de plate-bande recouverte de terre végétale très aérée

Dans le cas d'un sol léger et aéré, ici une plate-bande composée de terreau végétal mélangé à du sable, le coefficient d'absorption atteint des valeurs importantes, de l'ordre de 0.9. Par contre, cette absorption est très sélective en fréquence et chute rapidement après avoir atteint son maximum. De plus, le maximum n'est pas atteint aux mêmes fréquences en fonction de la zone où les tests ont été effectués.

Afin de mieux comprendre les différents phénomènes, on effectue des tests en laboratoire sur des échantillons de terre végétale à différents degrés d'humidité et de compaction. La terre végétale utilisée est un mélange spécial originellement conçu pour les toits verts. Le terreau a été fourni par la CPEUM.

Les résultats de ces tests sont présentés figure 30. Dans tous les cas, l'épaisseur de terreau testé est de 3" (7.5 cm). Les tests sont effectués sur fond rigide.

Le terreau sec présente un excellent coefficient d'absorption sur presque tout le spectre, avec des valeurs supérieures à 0.7 dès 400 Hz.

Lorsque le terreau est légèrement humide, on observe l'apparition d'un pic d'absorption très marqué vers 1000 Hz puis d'une chute en hautes fréquences. Dans le cas d'un terreau plus humide, le pic d'absorption semble se situer à plus hautes fréquences. Dans la gamme de fréquence couverte par le bruit routier, l'absorption est négligeable.

Si le terreau légèrement humide est faiblement compacté, l'absorption chute de façon importante et reste aux alentours de 10 %. Dans ce cas, on peut dire que le sol n'a plus de propriétés absorbantes.

Suite à ces essais, il est clair que l'absorption acoustique des sols végétaux deviendra rapidement négligeable si aucun entretien régulier n'est effectué. Dans le contexte autoroutier, il paraît donc illusoire de compter sur les propriétés des sols pour obtenir une efficacité à long terme des sols.

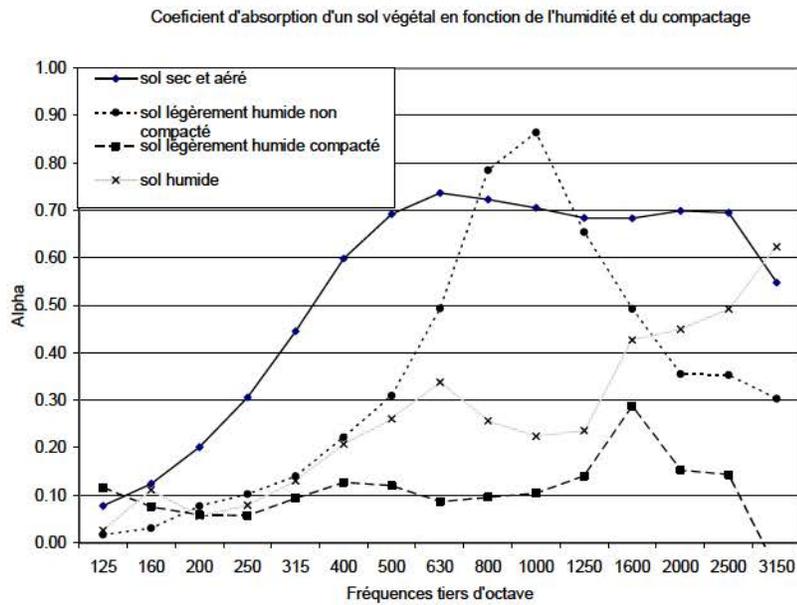


Figure 30 : Coefficient d'absorption d'un sol végétal selon différentes conditions

7 Conclusion :

La conception d'un écran antibruit végétalisé doit prendre en compte un nombre important de critères dépendant principalement de l'environnement immédiat de l'ouvrage. Ceci est vrai tant des points de vue esthétique et végétal que des points de vue acoustique et structural. Toutefois, nous avons mis au point un concept mixte, combinant à la fois une butte de faible hauteur et un écran classique.

Pour donner un aspect 'naturel' à l'écran, nous avons choisi ici une structure d'écran vertical dont la principale caractéristique est l'utilisation de matériaux à base de bois. Le recouvrement extérieur de l'écran est constitué de clins de bois, permettant une grande variété de motifs. Ces motifs permettent d'intégrer l'écran à l'intérieur d'un espace faiblement urbanisé, tel celui des banlieues de la rive-sud de Montréal. La seule végétalisation possible des surfaces verticales provient de l'utilisation de plantes grimpantes implantées à la base de l'écran.

D'un point de vue acoustique, l'utilisation d'écrans 'légers' dont le corps est constitué d'un contreplaqué 'marine' est suffisante. En effet, les phénomènes de contournement des ondes acoustiques vont très rapidement compenser la perte par transmission intrinsèque de l'écran. Lorsque 2 écrans sont nécessaires, ou lorsque l'écran fait face à une surface réfléchissante (ex. bâtiment industriel de grande ampleur en face de la voie de circulation), la face côté route de l'écran devra être recouverte de matériau acoustiquement absorbant afin d'éviter les phénomènes de réflexions multiples diminuant la perte par insertion de l'écran. Si des zones sensibles se trouvent face au nouvel écran, la pose de revêtements absorbants devra également être envisagée.

D'un point de vue structural, les 2 principales contraintes sont la profondeur hors gel et la résistance au vent. Dans tous les cas, les fondations doivent respecter la profondeur hors gel. Il est possible d'utiliser des systèmes de fondation de mise en œuvre simple, tels les pieux vissés, mais dans ce cas, la résistance latérale est faible. Pour compenser cette faiblesse, le maître-d'œuvre devra prévoir des sections de mur de refend permettant de transférer les efforts latéraux en efforts verticaux sur les systèmes de fondation.

On voit bien ici que la conception d'un écran antibruit végétalisé implique de nombreuses disciplines et doit être adaptée aux contraintes particulières du site. La diversité des solutions techniques possibles doit être mise au service du designer afin de s'assurer d'une bonne intégration de l'ouvrage. Parallèlement, le designer devra tenir compte des éléments des cahiers des charges acoustique et structural lors de l'élaboration de son projet.

Référence :

[1] Dagenais D, Froment J, Roberge Y. "Conception d'un écran anti bruit végétal adapté aux normes du Ministère des Transports du Québec, Documentation et critères de conception, volet portant sur le végétal et l'esthétique" *rapport final de la Chaire en paysage et environnement de l'Université de Montréal remis au Ministère des Transports du Québec, 03-2007*

[2] Dagenais D, Froment J, Roberge Y. "Conception d'un écran anti bruit végétal adapté aux normes du Ministère des Transports du Québec, Documentation et critères de conception, volet portant sur le végétal et l'esthétique" *rapport d'étape de la Chaire en paysage et environnement de l'Université de Montréal remis au Ministère des Transports du Québec, 07-2006*

[3] Oddo R, Atalla N. Mjitt M. "Conception d'un écran antibruit végétalisé : Volet acoustique et structural, Étude bibliographique et concepts retenus" *rapport d'étape remis par le groupe d'acoustique de l'Université de Sherbrooke au Ministère des Transports du Québec, septembre 2006*

[4] Oddo R. Panneton R. Ghatrifi Y. "Mesure des propriétés d'absorption acoustique d'échantillons d'asphaltes" *Rapport remis par le Groupe d'Acoustique de l'Université de Sherbrooke au Ministère des Transports du Québec, aout 2006*

[5] Recherche en matière de routes et de transports routiers : La réduction du bruit aux abords des voies routières, *Groupe d'experts scientifiques de l'OCDE, Paris, 1995.*

Sites web

<http://www.kaysersberg-plastics.com> : Écrans antibruit en polycarbonate

<http://www.tertu.com> : Écrans antibruit en bois

<http://www.ecib-bruit.com> : Écrans antibruit en bois

<http://www.ct.gov/dot> : Écrans antibruit en bois, Connecticut Department of transportation

<http://www.acoustock.com> : Écrans antibruit en métal fabriqués au Québec