

Développement d'une technique d'auscultation par onde guidée des boulons d'ancrage et des câbles de précontrainte noyés

Malcolm BEARD
Brian PAVLAKOVIC
Michael LOWE
Peter CAWLEY

Department of Mechanical Engineering
Imperial College of Science, Technology and Medicine (Angleterre)

RÉSUMÉ

Les boulons d'ancrage sont utilisés pour renforcer les toits des galeries dans les mines de charbon, et un contrôle non destructif adéquat de leur intégrité est nécessaire. La recherche a conduit à l'utilisation des ondes guidées afin d'ausculter les boulons d'ancrage en utilisant une méthode dite de pulse-écho. Des modes adéquats à basse et haute fréquence ont été identifiés à l'aide d'un programme modélisant la structure, et des expériences ont été conduites dans une mine et en laboratoire. De plus, l'application de la méthode à l'auscultation des câbles utilisés dans les ponts en béton précontraint a été étudiée. Cette recherche montre que l'approche proposée est réalisable, et qu'il y a également des possibilités d'auscultation d'autres structures noyées.

DOMAINE : Ouvrages d'art – Sciences de l'ingénieur.

ABSTRACT

Anchorage bolts are used in order to reinforce gallery roofs inside coal mines; an adequate non-destructive evaluation of their structural soundness is thereby necessary. Research has given rise to the introduction of guided waves as a means of examining anchorage bolts by use of the so-called "pulse-echo" method. Satisfactory low- and high-frequency modes have been identified thanks to a structural modeling program; moreover, experiments were conducted both in a mine and in the laboratory. This study also included applying the cable diagnostic method used in prestressed concrete bridges. Further work has shown that the proposed approach is indeed feasible and may lead to assessing other embedded structures as well.

FIELD: Structural engineering - Engineering sciences.

Introduction

Le système de support de type boulon d'ancrage est de plus en plus utilisé afin de renforcer les plafonds dans les mines de charbon du Royaume-Uni, et ce depuis 1990, car ce système offre plus de sûreté et améliore la productivité par rapport à l'utilisation plus conventionnelle des charpentes en acier. Les boulons d'ancrage sont des goujons en acier qui sont directement fixés dans le plafond afin d'éviter les mouvements de la strate rocheuse et donc d'améliorer la stabilité du plafond. Il existe une quantité considérable de données sur le mouvement de la strate pour estimer l'état des boulons d'ancrage, mais il n'y a pas actuellement de méthode efficace de contrôle non destructif (Clifford, 2000). Quelques techniques commencent à émerger pour les auscultations quand la roche est très dure et pour les boulons infiltrés, mais ces techniques sont souvent inadaptées pour les boulons d'ancrage dans les mines de charbon.

Les boulons d'ancrage standard utilisés dans cette application ont 21,7 mm de diamètre, et jusqu'à 3 m de longueur. La procédure d'installation impose que la roche soit préalablement percée, le trou étant plus large que le boulon lui-même ; le trou est ensuite rempli de capsules de résine époxyde à prise rapide. Une machine portable d'installation est utilisée pour tourner le boulon d'ancrage dans le trou, ce qui provoque l'éclatement des capsules et le mélange de la résine et du durcisseur. Après durcissement, une noix et une plaque d'assemblage sont mises sur le boulon, la plaque d'assemblage étant en contact avec le toit. Des nervures sur la surface du boulon contribuent au mélange et favorisent l'interaction avec la résine époxyde solidifiée. Un diagramme représentant l'installation complète et la méthode d'auscultation est présenté sur la figure 1.

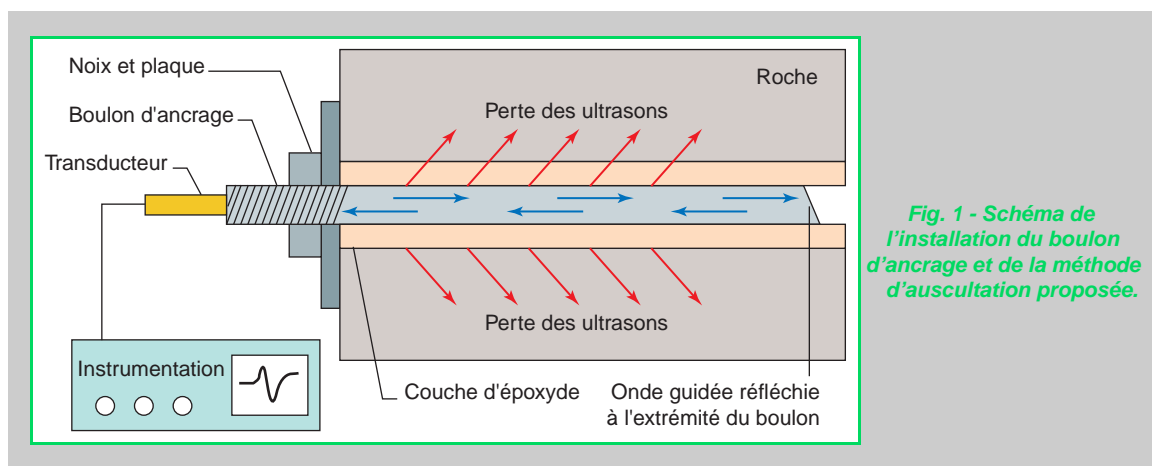


Fig. 1 - Schéma de l'installation du boulon d'ancrage et de la méthode d'auscultation proposée.

La méthode d'auscultation utilisée ici est un contrôle en « pulse-écho », réalisé à partir de l'extrémité libre du boulon d'ancrage. Un transducteur ultrasonore est fixé sur l'extrémité du boulon et est connecté à un instrument pulse-écho. Une salve de courte durée est utilisée pour exciter une onde guidée dans le boulon d'ancrage, l'onde guidée étant ensuite réfléchiée par l'extrémité du boulon et par des défauts majeurs. La connaissance précise des courbes de dispersion en vitesse d'onde permet le calcul de l'emplacement des défauts ainsi que la longueur du boulon, ceci à partir du temps d'arrivée des différents signaux. Une limitation importante en matière de distance contrôlée est que l'énergie ultrasonore tend à être diminuée par les pertes dans le milieu environnant, ce qui provoque l'atténuation de l'onde. Minimiser cette atténuation est le facteur essentiel pour la sélection d'un mode et d'une fréquence propices au contrôle.

Les chargements du boulon d'ancrage dus aux mouvements et à la dilatation de la strate rocheuse peuvent être considérables, particulièrement du côté charbon où le taux d'enlèvement mène à un grand niveau de redistribution des contraintes. La dilatation de la strate rocheuse dans la mine, parallèle à l'axe du boulon d'ancrage, peut causer une surcharge sur l'extrémité laissée libre du boulon d'ancrage. Dans ce cas, l'extrémité de la plaque subit un « gauchissement » avant que la rupture en tension n'apparaisse, donnant une indication visuelle de la surcharge. Néanmoins, cette garantie ne protège pas contre les mouvements en cisaillement de la strate, qui peuvent survenir si un plan normal à l'axe du boulon apparaît. Dans ce cas, les strates rocheuses glissent les unes sur les autres, causant une déformation du boulon en forme de « poignée de manivelle » car il contraint la roche à la frontière de la strate. Ce mouvement peut entraîner des surcharges locales dans la zone de déformation, et éventuellement la rupture du boulon. La technique d'auscultation proposée devrait être capable de détecter la longueur restante du boulon, donc de donner une indication sur la rupture. Il devrait être également possible de détecter d'autres défauts qui auraient pu fragiliser le boulon, comme la corrosion ou le manque de résine résultant d'un défaut d'étanchéité ou d'une installation incorrecte.

Un problème similaire est l'auscultation des câbles d'acier utilisés dans les bétons précontraints, et la même technique d'auscultation est utilisée pour cette application. Ces câbles renforcent la structure. Une infiltration d'eau et la corrosion due à une mauvaise étanchéité peuvent causer la rupture du béton sans avertissement. À la suite de l'effondrement du pont Ynys-y-Gwas au Royaume-Uni (Woodward *et al.*, 1988), un programme d'auscultation a été mis en place, en utilisant les techniques limitées alors disponibles. Les ondes guidées ont déjà été proposées pour un tel contrôle (Pavlovic *et al.*, 1998), bien que leur potentiel complet n'ait pas été déterminé. On peut trouver un résumé (The highways agency, 1999) de l'histoire du béton précontraint en France et en Angleterre ainsi que des techniques d'auscultation. Bien que cet article se concentre sur l'auscultation des boulons d'ancrage, les implications pour les contrôles de ces câbles sont discutées, avec des résultats expérimentaux qui déterminent la distance maximale d'auscultation.

Modélisation

Le développement du programme « Disperse » sur la modélisation générale des ondes guidées (Lowe, 1995 ; Pavlovic *et al.*, 1997 et 1999) a permis l'étude des différentes ondes guidées dans

le système du boulon d'ancrage avec plus de détails que les expériences sur site n'ont pu le faire. De plus, les ondes guidées dans les boulons d'ancrage et les câbles sont complètement différentes des ondes de volumes en compression ou en cisaillement connues, et il est donc essentiel de commencer le travail par la compréhension du comportement de ces ondes. Le programme « Disperse » a été utilisé pour déterminer les solutions modales du système du boulon d'ancrage et pour calculer les propriétés des différentes ondes. Le boulon d'ancrage a été modélisé comme un système axisymétrique à trois couches, consistant en une couche d'acier et une couche de résine époxyde noyées dans un espace semi-infini de calcaire, comme le montre la figure 2. Le calcaire a été choisi comme matériau environnant afin d'effectuer une comparaison directe avec les résultats obtenus dans la mine. Les propriétés des matériaux qui ont été utilisées pour l'acier, la résine époxyde et le calcaire sont respectivement : 206 GPa, 14 GPa, 40 GPa pour le module d'Young, 0,25 ; 0,30 ; 0,29 pour le coefficient de Poisson et 7 900 kg.m⁻³, 2 000 kg.m⁻³, et 2 520 kg.m⁻³ pour la densité. À haute fréquence, l'amortissement du matériau est aussi une cause importante d'atténuation, et il a été également inclus dans le modèle.

La sélection d'un mode convenable pour le contrôle peut être faite en examinant minutieusement les courbes de dispersion. Il est préférable d'utiliser un mode présentant une faible atténuation (due aux pertes) dans le milieu environnant, de maximiser la distance d'auscultation, et également d'utiliser un mode ayant une grande vitesse d'énergie, afin de réduire le risque d'avoir d'autres modes compliquant le signal reçu. La vitesse d'énergie est la vitesse à laquelle le paquet d'énergie se propage le long du boulon. Ainsi, en excitant un mode à un point de vitesse d'énergie maximale, on limitera les effets de dispersion sur la propagation de l'onde. Ces conditions sont satisfaites par le mode fondamental L(0,1), et l'utilisation de ce mode est à la base du contrôle à « basse fréquence ». De plus, on a trouvé que les modes à haute fréquence, modes à faible perte qui se propagent dans les câbles noyés (Pavlakovic, Lowe, Alleyne et Cawley, 1997) peuvent être utilisés pour l'auscultation des boulons d'ancrage, et l'utilisation de tels modes est à la base du contrôle à « haute fréquence ». Les modes à basse fréquence ne sont pas adaptés à l'auscultation des câbles, car les ondes de volumes dites de « perte » (leaky) ne sont pas atténuées dans le coulis, et les réflexions ultérieures des gaines du câble peuvent donc compliquer les signaux reçus.

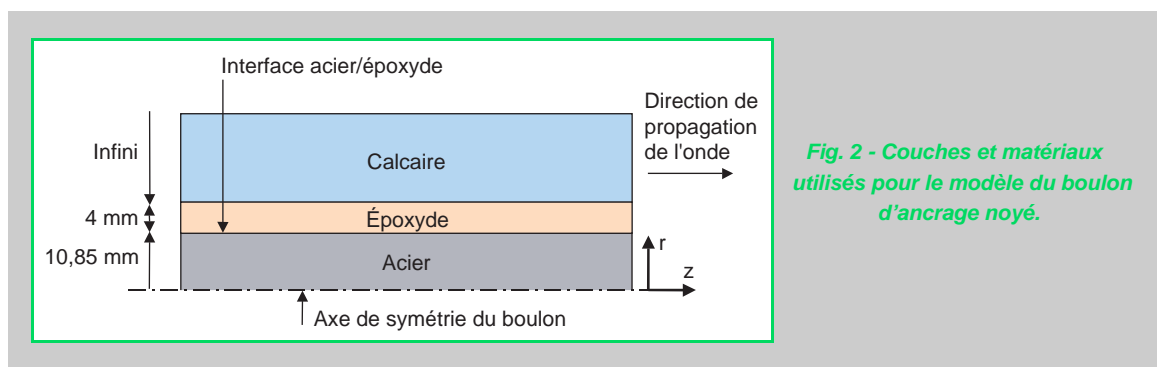


Fig. 2 - Couches et matériaux utilisés pour le modèle du boulon d'ancrage noyé.

Modes à basse fréquence

Les courbes de dispersion en atténuation prédites pour le système du boulon d'ancrage sont présentées sur la figure 3 pour la bande de fréquence 0-500 kHz, et les courbes de vitesse d'énergie sont présentées sur la figure 4. Les courbes de dispersion montrent que le mode L(0,1) a un minimum d'atténuation à environ 70 kHz. Il y a deux minima qui atteignent une plus faible atténuation, mais ils correspondent aux points des modes L(0,1) et L(0,2) pour lesquels une large quantité d'énergie se propage dans la couche de résine époxyde. Par conséquent, la vitesse d'énergie en ces points est très faible, et leur excitation serait également difficile, ce qui rend ces points indésirables pour le contrôle. Le minimum en atténuation sur le mode L(0,1) à 70 kHz correspond à un maximum en vitesse d'énergie, ce qui rend ce point très intéressant pour les contrôles. L(0,1) est le seul mode en dessous de 80 kHz qui peut se propager sur une distance significative, et qui ne risque pas par conséquent d'être confondu avec d'autres modes. Il est également très facile à exciter en utilisant un seul transducteur de type « compression », car il a un profil quasiment en extension.

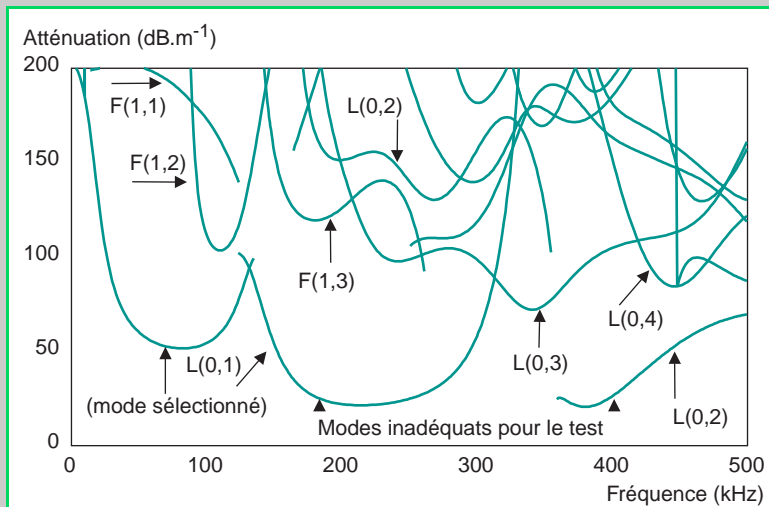


Fig. 3 - Courbes de dispersion en atténuation à basse fréquence pour le modèle du boulon d'ancrage, consistant en une barre de 21,7 mm de diamètre, entourée d'une couche de 4 mm de résine époxyde, l'ensemble noyé dans du calcaire.

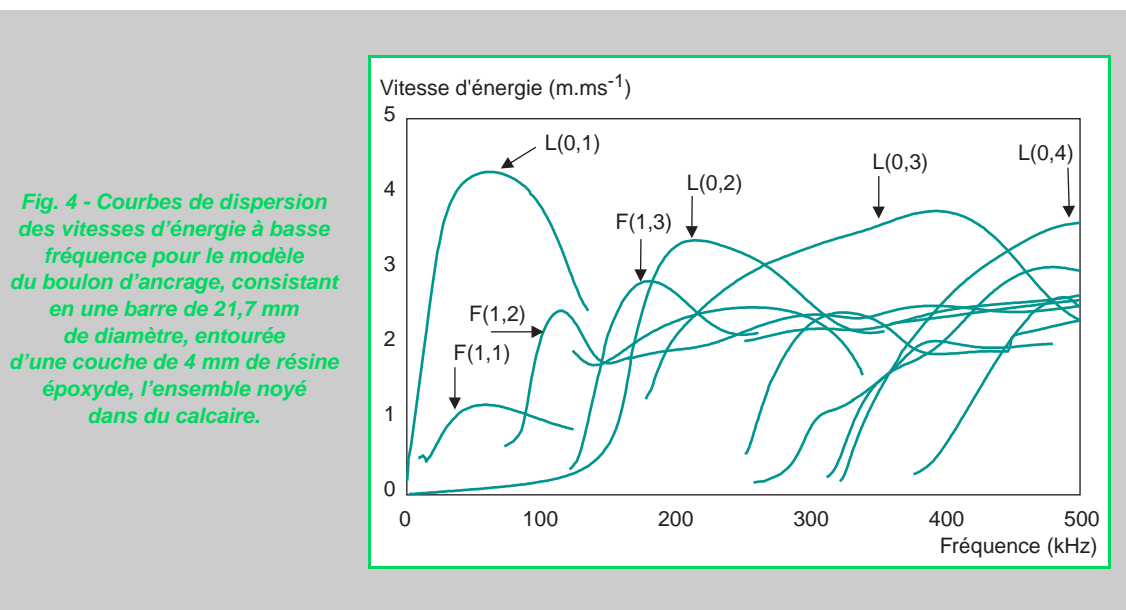


Fig. 4 - Courbes de dispersion des vitesses d'énergie à basse fréquence pour le modèle du boulon d'ancrage, consistant en une barre de 21,7 mm de diamètre, entourée d'une couche de 4 mm de résine époxyde, l'ensemble noyé dans du calcaire.

Après avoir identifié le potentiel du mode $L(0,1)$ pour le contrôle, il est important d'examiner la sensibilité de ce mode aux changements de propriétés du matériau et de la géométrie. Le minimum en atténuation prédit pour le mode $L(0,1)$ est à peu près 50 dB.m^{-1} à 70 kHz , et en supposant qu'une atténuation de 100 dB.m^{-1} pourrait être compensée par l'instrumentation, la distance d'auscultation pourrait être limitée à 1 m . Néanmoins, en pratique, des longueurs de propagation supérieures ont été obtenues, ce qui montre que le modèle ne représente pas exactement le cas réel. Les effets de l'épaisseur de la résine époxyde et de son module, du module de la roche, et de la qualité du joint écrou/résine époxyde ont été examinés en faisant varier les différents paramètres du modèle. Cette étude montre qu'une réduction du module nominal de la résine époxyde (14 GPa) abaisserait la fréquence optimale du contrôle et l'atténuation prédite. En réalité, ceci est probable à cause de la présence de polluants dans l'adhésif due au processus de mise en œuvre et des conditions de mélange qui sont loin d'être idéales. De plus, nous avons vu qu'un joint mal réalisé était à l'origine d'une forte réduction en atténuation, sans affecter la fréquence optimale. Ceci suggère que la fréquence optimale pourrait être inférieure à 70 kHz , et que le minimum en atténuation pourrait être inférieur à 50 dB.m^{-1} . Il a été trouvé que l'épaisseur de la couche de résine époxyde affecte considérablement les caractéristiques du mode $L(0,1)$, ce qui augmente la possibilité de trouver des défauts d'encapsulation. Le mode présente une faible sensibilité au module de la roche, ce qui montre que le contrôle pourrait être conduit sur n'importe quel type de roche avec confiance. Ces facteurs sont discutés de façon plus détaillée dans Beard et al. (2002).

Modes à haute fréquence

Les courbes de dispersion en atténuation prédites pour le système du boulon d'ancrage sont présentées sur la figure 5 pour une bande fréquentielle de 0-5 MHz. Seuls les modes axiaux sont présentés, car ces modes ont généralement une atténuation plus faible que les modes dits de flexion. Les courbes montrent des minima distincts en atténuation, avec en général une baisse en atténuation quand la fréquence augmente. Néanmoins, dans ce système, quand la fréquence augmente, l'énergie se propageant dans certains modes devient de plus en plus concentrée au centre de la barre. Ceci signifie que la barre interagit moins avec le matériau environnant, et les pertes sont plus faibles. Au voisinage de 2 MHz, les minima en atténuation commencent à augmenter quand les effets d'amortissement dus au matériau commencent à devenir significatifs. Plusieurs modes entre 2 et 3 MHz ont une atténuation de 17 dB.m^{-1} environ ; ils sont potentiellement intéressants pour l'auscultation d'un boulon d'ancrage de 3 m de long, en supposant qu'une atténuation de 100 dB.m^{-1} puisse être compensée par les instruments. La modélisation montre également que chaque minimum en atténuation apparaît à un point de vitesse d'énergie maximale, faisant de ces points des points d'utilisation optimale. La nature des modes, avec très peu de déplacement à la surface de la barre, montrent que les variations des modules de la roche et de la résine époxyde ainsi que l'épaisseur de cette dernière ont très peu d'effet sur les propriétés du mode. De plus, à ces fréquences, approximativement la moitié de l'atténuation est due à l'amortissement même de l'acier, et elle n'est pas considérablement affectée par les couches environnantes. La vitesse de l'énergie de ces modes est proche de la vitesse de volume longitudinale dans l'acier, et varie très légèrement avec les paramètres du modèle. Il est par conséquent peu probable que les modes à haute fréquence soient sensibles aux défauts présents à la surface, comme la perte de résine.

Les modes à faible perte sont typiques des systèmes noyés (Pavlakovic et *al.*, 2001), et ont déjà été proposés pour l'auscultation de câbles (Pavlakovic et *al.*, 1998). Cette référence inclut des détails sur les relations de dispersion pour les barres intérieures injectées, qui ne sont donc pas reproduites ici. L'atténuation prédite pour les modes à haute fréquence dans des câbles intérieurs injectés est plus importante que celle dans les boulons d'ancrage, essentiellement parce que les fils ont un plus petit diamètre, typiquement de 5 à 7 mm. Les torons, qui constituent un autre type de câble, comportant plusieurs fils torsadés, peuvent être contrôlés à la fréquence optimale de chacun. Une telle géométrie complexe est hors de portée de notre modélisation numérique, mais des études expérimentales présentées ci-après suggèrent qu'il n'y a pas de modes qui peuvent se propager dans tous les fils à la fois.

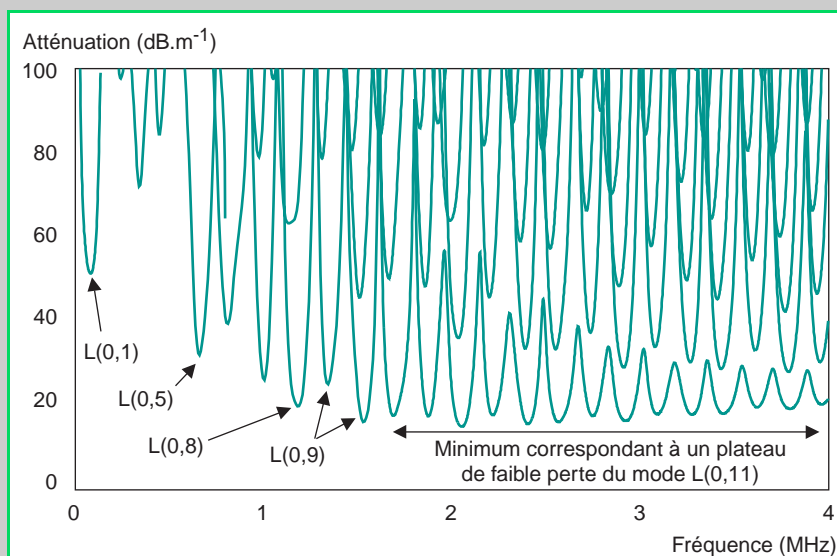
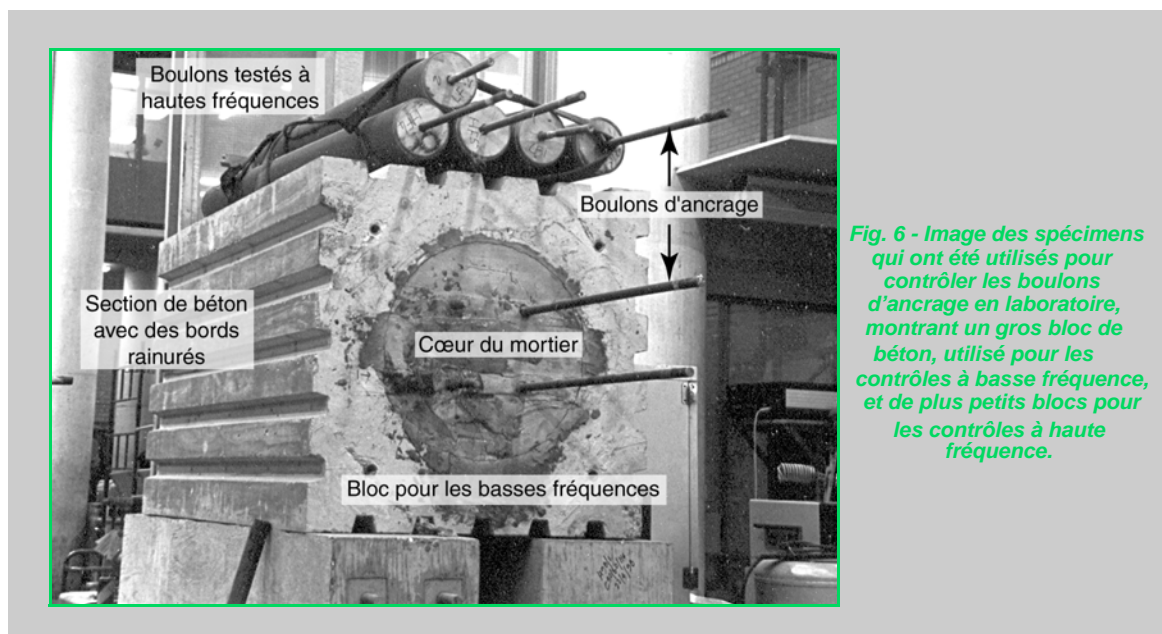


Fig. 5 - Courbes de dispersion en atténuation à haute fréquence pour le modèle du boulon d'ancrage, consistant en une barre de 21,7 mm de diamètre, entourée d'une couche de 4 mm de résine époxyde, l'ensemble noyé dans du calcaire, montrant les modes à faible perte.

Résultats des contrôles sur les boulons d'ancrage

Bien qu'un simple contrôle puisse être conduit en laboratoire sur des portions libres de barre en acier, la majorité des contrôles effectués requièrent que les spécimens soient noyés. La construction de spécimens de laboratoire pour les contrôles à basse fréquence n'était pas si évidente, car le matériau noyant la barre devait être assez épais pour éviter aux ondes générées à l'interface barre/matériau environnant de se réfléchir à la frontière de ce dernier et de revenir vers le transducteur. Un bloc de 2 m de long et de 1 m² de section a été moulé avec des trous pour installer les boulons d'ancrage sans avoir besoin de percer. Des précautions ont été prises afin de réduire le risque de recevoir des ondes provenant des bords du bloc, en les biseautant et en utilisant un béton grossier près des faces du bloc pour augmenter la diffusion de l'onde. Les contrôles à haute fréquence ont également été faits sur ce bloc, et également sur de plus petits spécimens dont les diamètres n'excédaient pas 150 mm. La plus petite longueur d'onde des modes à haute fréquence permet de ne pas utiliser beaucoup de matériau noyant, car les ondes générées par les pertes sont vite diffusées dans le béton. La figure 6 montre la sélection de spécimens qui ont été construits pour les contrôles en laboratoire.

En plus des spécimens de laboratoire, des contrôles sur site ont également été conduits dans une section non utilisée d'une mine de calcaire. Bien que le calcaire soit beaucoup plus dur que la roche trouvée dans la mine de charbon, la nature stable de la strate était utile pour éviter aux barres d'être déformées avec le temps. L'étude de modélisation a également suggéré que le type de roche n'affectait pas énormément les propriétés du mode, que ce soit à haute ou à basse fréquence. Le bon état des tunnels nous a permis d'utiliser un équipement de laboratoire, ce qui n'aurait pas été possible dans la mine de charbon. Les boulons d'ancrage et l'accès à la mine ont été obtenus avec l'aide de la société de consultants Rock Mechanics Technology Limited.



Résultats à basse fréquence

Le mode L(0,1) a été excité par un seul transducteur de 21 mm de diamètre travaillant en compression, à une fréquence centrale de 40 kHz, attaché fermement à l'extrémité du boulon d'ancrage. Ce transducteur a été spécialement conçu pour cette application par Alltran. Le transducteur était amorti pour réduire la résonance et envoyait un signal sinusoïdal de six à dix cycles, modifié par une fenêtre gaussienne. Un compromis est requis car, si un grand nombre de cycles permet à l'énergie d'être concentrée dans une bande passante fréquentielle étroite, la durée plus importante réduit la possibilité de travailler dans le champ proche. Cette combinaison du transducteur et du signal d'excitation donne les résultats les plus fiables. L'instrumentation a été adaptée à partir du « wavemaker 16 » fabriqué par Guided Ultrasonics Limited, qui est actuellement utilisé pour l'auscultation de tuyaux (Alleyne et al., 2001).

Un contrôle « pulse-écho » a été effectué sur un boulon d'ancrage long de 2,3 m, dans une bande de fréquence allant de 10 à 100 kHz. Ce boulon était noyé dans un bloc long de 2 m et la partie restante du boulon était en saillie par rapport à la face du bloc. L'extrémité du boulon pouvait être détectée à toutes les fréquences entre 30 et 60 kHz, mais les résultats étaient meilleurs entre 30 et 40 kHz. La figure 7 montre un signal temporel enregistré à 35 kHz en utilisant une salve de six cycles. Le bruit électrique apparaissant au début est dû au circuit pulse/récepteur, et la réflexion du bout de la barre est ensuite clairement visible à 1 ms. La vitesse d'énergie a été mesurée avec succès à chaque fréquence de contrôle et a été comparée aux prédictions pour un boulon noyé dans du béton. Cette vitesse d'énergie mesurée était plus constante sur la bande fréquentielle que celle prédite, et à 3 % près de celle prédite à 60 kHz mais à 10 % près de celle prédite à 30 kHz. Ceci, et le fait que la fréquence optimale était en dessous de 70 kHz, peuvent être expliqués par la probable réduction de dureté dans la couche de résine époxyde par rapport à la valeur nominale de 14 GPa.

La figure 8 montre les différents échos sur le système boulon-résine époxyde-environnement. Ces résultats, sur un boulon d'ancrage de 2,4 m de long partiellement encapsulé, avec une perte de résine sur le premier mètre, ont été obtenus en utilisant la même configuration de contrôle. Les différents modes sont identifiés par leur vitesse de propagation. Une réflexion claire du mode $L(0,1)$ de l'extrémité du boulon peut être clairement identifiée. De plus, des réflexions du mode $L(0,1)$ et du mode fondamental de flexion $F(1,1)$ sont obtenues à partir du moment où la résine existe. Une seconde réflexion de $L(0,1)$ venant de la résine peut aussi être vue, à partir d'une onde qui s'est propagée dans la partie du boulon exposée depuis le transducteur vers l'interface et revenant deux fois. Bien que le coefficient de réflexion estimé à cette interface ne soit que de quelques pourcentages, l'onde réfléchie est détectable car elle se propage seulement sur une section libre du boulon, et n'est donc pas atténuée par les pertes. Une grande amplification est nécessaire pour

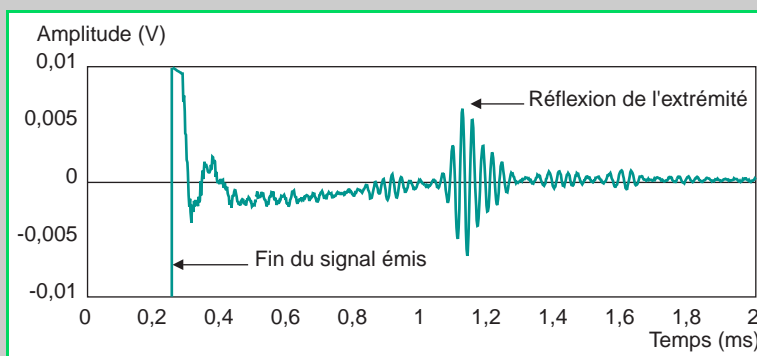


Fig. 7 - Signal temporel enregistré pour un boulon d'ancrage long de 2,3 m, noyé dans un bloc de béton de 2 m, montrant une réflexion claire de l'extrémité noyée. L'excitation était une salve de fréquence centrale de 35 kHz, et de six cycles modifiée par une fenêtre gaussienne.

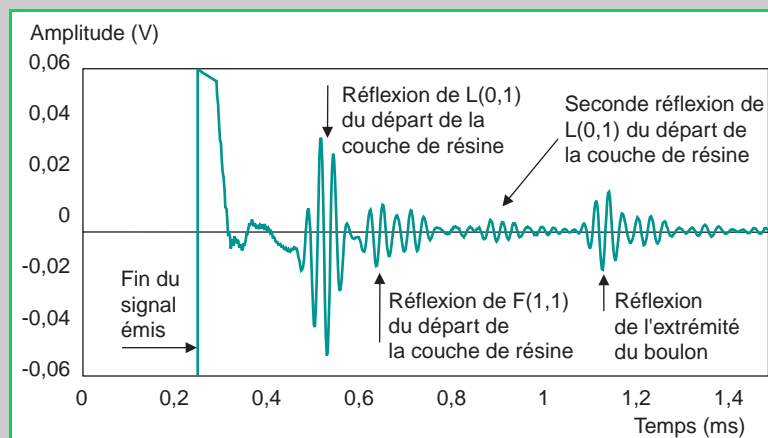
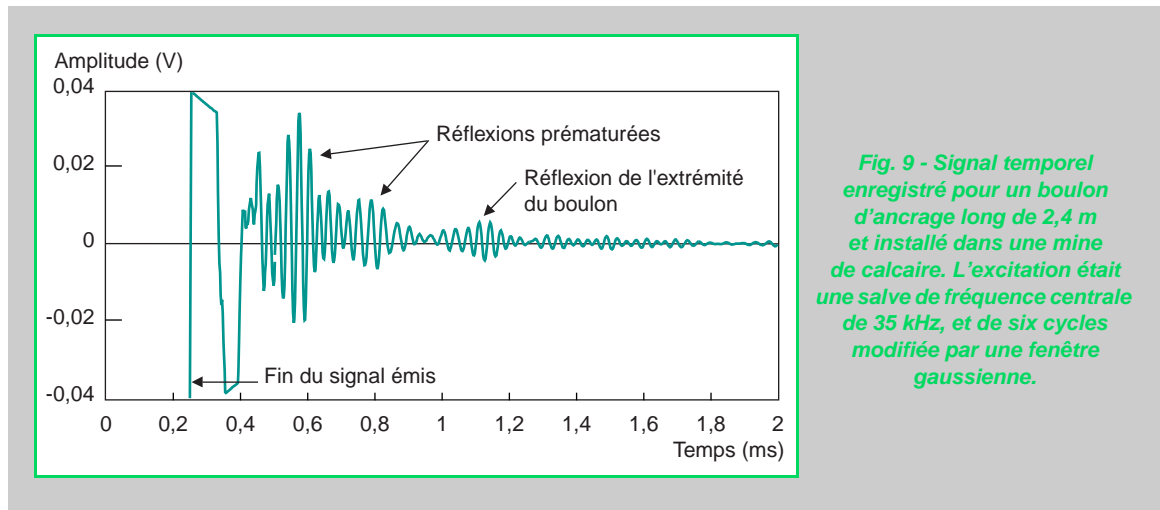


Fig. 8 - Signal temporel enregistré pour un boulon d'ancrage long de 2,4 m et partiellement encapsulé, avec une perte de résine sur le premier mètre. L'excitation était une salve de fréquence centrale de 35 kHz, et de six cycles modifiée par une fenêtre gaussienne.

détecter la réflexion de l'extrémité noyée, et la réflexion de l'interface apparaît importante parce qu'elle est également sujette à cette amplification.

La réflexion de l'extrémité du boulon de 2,4 m de long noyé dans la carrière de calcaire est présentée sur la figure 9. La réflexion de l'extrémité de la barre est à peine perceptible après 1 ms, et il y a également d'autres réflexions avant même ce délai. La cause de ces réflexions n'est pas connue, bien qu'il semble qu'elles soient dues à une cassure géologique, donc à un changement du lit du boulon, ainsi qu'il en existe pour certains boulons d'ancrage contrôlés sur ce site. Un travail futur conduira à « sur-carotter » certains boulons pour déterminer la cause de ces réflexions. Ces réflexions sont plus grandes que celle correspondant à la réflexion de l'extrémité du boulon car elles ont subi beaucoup moins d'atténuation. Ceci a causé des problèmes, car ces réflexions initiales peuvent saturer les amplificateurs à gain élevé du récepteur requis pour détecter les réflexions de l'extrémité du boulon. Le long recouvrement en temps peut également masquer la réflexion de l'extrémité. Un développement de l'instrumentation, afin de permettre l'application d'un gain variable en fonction du temps, devrait permettre de régler ce problème.



Résultats à haute fréquence

Les modes à haute fréquence ont été excités en utilisant un transducteur en immersion très amorti qui possède une fréquence centrale de 2,25 MHz, donnant de bons résultats sur une large bande fréquentielle. Les signaux étaient émis et reçus par un instrument « pulse-écho » conçu spécialement pour ces contrôles. Afin de maximiser l'énergie se propageant dans le mode à faible perte, un signal de courte bande fréquentielle, modulé par une fenêtre gaussienne et ayant au maximum 300 cycles, a été utilisé pour exciter le transducteur. La fréquence centrale a été choisie pour correspondre à un minimum en atténuation prédit au préalable par le programme « Disperse ». Les recherches ont montré que des interférences destructives peuvent réduire l'amplitude du signal si la bande d'excitation est assez large pour exciter plus d'un mode à faible perte.

La figure 10 montre un exemple de signal temporel enregistré pour un boulon long de 3 m et complètement encapsulé, installé dans une mine de calcaire. La réflexion de l'extrémité est clairement visible, et le bruit au début du signal est dû à la grande amplification des faibles réflexions et aux réverbérations dans le champ proche. La figure 11 montre le signal temporel enregistré pour un boulon de 2,4 m, noyé dans du béton, et dont une partie proche de la fin du boulon a subi un étirement. La géométrie de l'étirement était représentative de ce qui avait été trouvé pour de vrais boulons avant la cassure. Un mode à faible perte et de fréquence légèrement plus haute a été utilisé pour ce contrôle, afin de s'assurer que la réflexion de l'étirement et la réflexion de l'extrémité du boulon soient séparées dans le temps, mais avec plus d'atténuation. La réflexion du bout est clairement visible, et une réflexion du collet peut être également aperçue. Les contrôles sur des spécimens en partie encapsulés ont confirmé qu'il n'y a pas de réflexion initiale de la couche de résine, vérifiant donc que les modes à faible perte sont pratiquement insensibles au milieu environnant et aux défauts de surface (Pavlakovic et al., 1999). Les temps d'arrivée de la réflexion correspondent bien à ceux pré-

aits, et la distance maximale d'auscultation est également consistante avec les prédictions en atténuation faites par le modèle.

Le modèle a également prédit avec succès les fréquences auxquelles les minima en atténuation se produisent. La figure 12 montre une excellente concordance entre les minima en atténuation prédits par les courbes de dispersion du système de boulon d'ancrage et les mesures expérimentales de la réflexion de l'extrémité du boulon d'ancrage à des fréquences différentes.

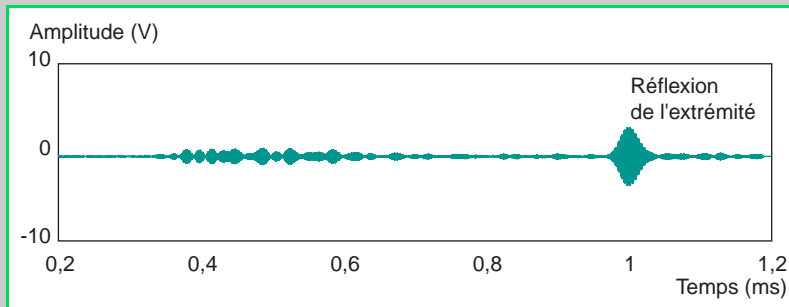


Fig. 10 - Signal temporel enregistré à 2,4 MHz pour un boulon d'ancrage long de 3 m dans une mine de calcaire.

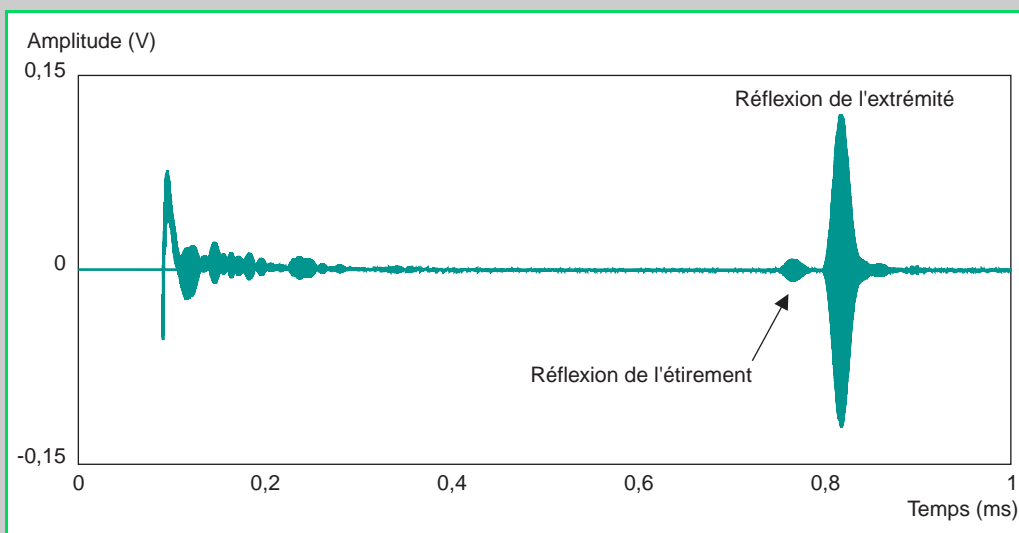


Fig. 11 - Signal temporel enregistré à 2,4 MHz pour un boulon d'ancrage long de 2,4 m et étiré, noyé dans du béton.

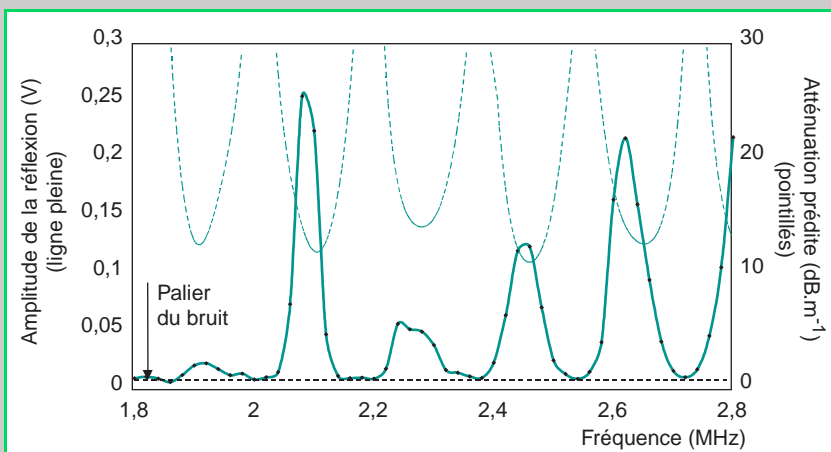


Fig. 12 - Atténuation prédite et réflexion de l'extrémité mesurée à différentes fréquences pour un boulon d'ancrage de 2,4 m de long, bisauté et placé dans une mine de calcaire.

Effet de la courbure et de l'angle du bout du boulon

On a découvert que les modes à haute fréquence étaient sensibles à la courbure du boulon, ce qui les rend inutilisables pour étudier des boulons qui ont été déformés par le mouvement des roches (Beard *et al.*, 2001). Ceci n'était pas prévu, car la longueur d'onde est bien plus petite que le plus grand rayon de courbure de la déformation. L'explication de ce fait tient aux différences des profils du mode en déplacement et en contrainte entre une section droite ou courbe du boulon, et ceci est le sujet d'une autre recherche qui sera publiée séparément. L'utilisation du mode L(0,1) dans d'autres applications suggère qu'il n'est pas affecté par la courbure (Vogt *et al.*, 2001), et qu'il peut donc être utilisé sur des boulons droits ou déformés.

Les boulons d'ancrage se terminent par un biseau dans leur partie noyée, afin d'aider à l'installation. L'effet de cet angle sur la réflexion des ondes guidées a été étudié expérimentalement, et le détail des résultats sera publié séparément. En général, le mode L(0,1) n'est pas affecté par l'angle mais, pour les modes à haute fréquence, une atténuation jusqu'à 40 dB.m⁻¹ peut être mesurée si l'extrémité n'est pas droite. Des résultats positifs ont été obtenus pour des boulons dont l'extrémité n'était pas droite, mais la fiabilité des contrôles serait bien meilleure si l'extrémité était conçue avec une surface réfléchissante plate. Ceci pourrait être obtenu en ajustant un bouchon biseauté au bout du boulon coupé droit, ou simplement en introduisant une coupure dans le boulon à l'aide d'une scie.

Résultats des contrôles sur les câbles

La plupart des résultats de la recherche sur les boulons d'ancrage sont également applicables à l'auscultation de câbles de précontrainte, comme les effets des défauts de géométrie et leur courbure. Néanmoins, afin de déterminer la distance maximale de contrôle, une connaissance approfondie de l'atténuation de l'onde due aux pertes dans le milieu environnant et à l'amortissement du matériau est nécessaire. Une série d'expériences ont été conduites sur des câbles noyés de petites longueurs (20-30 mm), afin que de multiples réflexions soient obtenues à l'extrémité du câble. La technique utilisée était la même que celle du boulon d'ancrage, c'est-à-dire une instrumentation « pulse-écho ». Le signal incident comprenait 200 cycles et une bande fréquentielle étroite. L'amplitude relative de ces réflexions peut être utilisée pour estimer l'atténuation globale, sachant que la réflexion de l'extrémité d'un câble est proche de l'unité. Les fréquences auxquelles les minima en atténuation existent sont prédites précisément par la modélisation, mais la quantité d'atténuation prédite est très dépendante de la qualité de l'interface matériau injecté/câble et des coefficients d'amortissement du matériau. Pour cette raison, les résultats expérimentaux ont été considérés comme plus fiables. L'atténuation totale mesurée était d'environ 20 dB.m⁻¹ dans le fil central (diamètre de 5,5 mm) d'un toron de diamètre 15,9 mm. En supposant que l'instrumentation peut compenser une atténuation de 100 dB.m⁻¹, ceci équivaut à une distance maximale de contrôle de 1,5 m pour une rupture complète, quand les effets de la cassure ont été pris en compte. L'atténuation dans les câbles environnants est environ trois fois supérieure ; elle est due aux effets de courbure discutés dans la section précédente, ce qui limite un peu plus la distance de propagation et donc d'auscultation. L'atténuation minimale mesurée sur des fils seuls de 7 mm et 5 mm de diamètre était de 27 dB.m⁻¹ et 40 dB.m⁻¹ respectivement. Ceci équivaut à une auscultation sur des spécimens pouvant atteindre 1,2 m de longueur pour un diamètre de 7 mm, et 0,8 m quand le diamètre est 5 mm. La longueur d'auscultation pour des spécimens comportant des défauts partiels de profondeur sera moindre, en raison d'un coefficient de réflexion réduit.

Discussion et conclusions

Nous avons montré que les boulons d'ancrage jusqu'à 3 m de longueur peuvent être contrôlés avec succès par des ondes guidées, en utilisant le mode fondamental L(0,1), et par d'autres modes à plus hautes fréquences qui ont moins de pertes dans le milieu environnant. L'atténuation du mode L(0,1) et sa fréquence optimale de travail sont plus faibles que celles prédites par un modèle fondé sur les propriétés nominales du matériau, mais ceci peut être expliqué par une mauvaise liaison entre la roche et la résine époxyde et également un module pour la résine époxyde moindre que ce qui a été estimé, probablement à cause du mauvais mélange et de la présence de polluants. Ces deux facteurs sont typiques de toutes les installations. Une bonne concordance entre le modèle et les résultats

expérimentaux a été obtenue quand ces facteurs étaient pris en considération. Le comportement des modes à haute et basse fréquence est très différent, et aucun contrôle n'a offert une solution globale satisfaisante. Le contrôle à basse fréquence peut être utilisé pour déterminer la longueur résiduelle du boulon, pour identifier les défauts comme l'encapsulation partielle du boulon et la possibilité d'une corrosion proche de la surface du boulon. Le contrôle à haute fréquence n'est pas sensible aux défauts de surface, et peut donc être utilisé pour donner une réponse fiable sur la longueur du boulon, même quand la corrosion de surface ou les caractéristiques géologiques de la roche compliquent les résultats du contrôle à basse fréquence. Le fait que les ondes à haute fréquence soient atténuées par la courbure permet également de déterminer si les boulons sont déformés ou non. Un contrôle utilisant les deux fréquences devrait donc être capable de trouver les défauts et les longueurs résiduelles sur la plupart des boulons.

Les résultats de cette recherche sont très prometteurs, et une commercialisation de la technique d'auscultation des boulons d'ancrage suivra les développements de l'instrumentation. Ceci inclura la possibilité d'appliquer un gain variable en temps aux signaux reçus, ce qui améliorera la versatilité du contrôle en évitant les réflexions initiales qui saturent les amplificateurs. L'instrument devra également être capable d'effectuer des contrôles à haute et basse fréquence, et produit pour être en conformité avec les critères de sécurité dans les mines. La distance maximale de contrôle qui peut être auscultée de façon fiable dans la plupart des câbles de précontrainte est limitée à environ 1 m, à cause de la grande atténuation due aux pertes, par fuites, dans le milieu environnant. L'utilité de la technique pour ausculter les câbles est donc limitée à la recherche de ruptures dans la région d'ancrage. Il y a d'autres applications où la technique peut être adaptée pour les besoins du contrôle non destructif. Le contrôle à haute fréquence peut être utilisé pour contrôler les boulons d'ancrage enfouis et injectés qu'on utilise dans d'autres applications du génie civil, où la non-déformation est supposée, et pourrait également être utilisé pour ausculter les aciers passifs dans le béton. Des recherches dans ces domaines, notamment sur l'effet de la courbure et la géométrie du défaut, sont actuellement en cours.

Remerciements. *Ce travail a été financé par le Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC) et a été conduit en collaboration avec Rock Mechanics Technology Ltd et le Transport Research Laboratory. Le travail de Brian Clifford (RMT) et Richard Woodward (TRL) a été essentiel dans la fourniture et l'installation des spécimens, et les auteurs sont également reconnaissants pour leur aide au cours de ce programme de recherche.*

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALLEYNE D.N., PAVLAKOVIC B.N., LOWE M.J.S. and CAWLEY P., Rapid, long range inspection of chemical plant pipework using guided waves, *Insight*, vol. 43 (2), 2001, pp. 93-96.
- BEARD M.D., LOWE M.J.S., CAWLEY P., Inspection of rockbolts using guided waves, in *Review of Progress in QNDE*, eds. D.O. Thompson and D.E. Chimenti, vol. 20, American Institute of Physics, New York, 2001, pp. 1156-1163.
- BEARD M.D., LOWE M.J.S., CAWLEY P., Development of a guided wave inspection technique for rock bolts, *Insight*, vol. 44(1), 2002, pp. 19-24.
- CLIFFORD B., Rock Mechanics Technology Ltd., *Ultrasonics for integrity testing of rock bolts in mines*, HSE Contract Report Number 3811BC20, 2000.
- LOWE M.J.S., *Matrix techniques for modelling ultrasonic waves in multilayered media*, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 42, 1995, pp. 525-542.
- PAVLAKOVIC B.N., LOWE M.J.S., ALLEYNE D.N., CAWLEY P., Disperse: a general purpose program for creating dispersion curves, in *Review of Progress in QNDE*, eds. D.O. Thompson and D.E. Chimenti, vol. 16, 1997, Plenum Press, New York, pp. 185-192.
- PAVLAKOVIC B.N., LOWE M.J.S., CAWLEY P., Guided ultrasonic waves for the inspection of post-tensioned concrete bridges, in *Review of Progress in QNDE*, eds. D.O. Thompson and D.E. Chimenti, vol 17, 1998, Plenum Press, New York, pp. 1557-1564.
- PAVLAKOVIC B.N. LOWE M.J.S., A general purpose approach to calculating the longitudinal and flexural modes of multi-layered, embedded, transversely isotropic cylinders, in *Review of Progress in QNDE*, eds. D.O. Thompson and D.E. Chimenti, vol. 18, 1999, Plenum Press, New York, pp. 239-246.

PAVLAKOVIC B.N., LOWE M.J.S., CAWLEY P., Prediction of reflection coefficients from defects in embedded bars, in *Review of Progress in QNDE*, eds. D.O. Thompson and D.E. Chimenti, vol. 18, **1999**, Plenum Press, New York, pp. 207-214.

PAVLAKOVIC B.N., LOWE M.J.S., CAWLEY P., High frequency low loss ultrasonic modes in imbedded bars, *Journal of Applied Mechanics*, vol. 68, **2001**, pp. 67-75.

The Highways Agency, SETRA, LCPC, *Post-tensioned concrete bridges*, Thomas Telford Publishing, London, **1999**.

VOGT T., LOWE M.J.S., CAWLEY P., Cure monitoring using guided ultrasonic waves in wires, in *Review of Progress in QNDE*, eds. D.O. Thompson and D.E. Chimenti, vol. 20, **2001**, American Institute of Physics, New York, pp. 1642-1649.

WOODWARD R., WILLIAMS F., Collapse of the Ynys-Y-Gwas bridge, West Glamorgan, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, vol. 84, **1988**, pp. 635-669.