

Le contrôle non destructif des ouvrages de génie civil

Jamal RHAZI
Gérard BALLIVY

Institut des matériaux et systèmes intelligents
Département de génie civil
Université de Sherbrooke (Canada)

Note

technique

Introduction

Le passage du temps laisse sa trace sur les structures de génie civil. Ce vieillissement est consécutif à une dégradation des propriétés mécaniques, physiques et chimiques des matériaux de construction. Ces dégradations, d'origines diverses (retrait excessif, gel-dégel, corrosion, réaction alcali-granulats, charges de service, etc.) éventuellement combinées, ont pour conséquence la fissuration et l'altération de ces matériaux.

La dégradation des structures est un problème général qui affecte tous les types d'ouvrages, superficiels ou souterrains. Face à ce problème, les choix économiques actuels des sociétés industrielles sont orientés vers la sauvegarde et la réparation des structures existantes plutôt que vers la démolition et la construction de nouvelles structures. Cette solution est toutefois d'un coût très élevé, en progression constante. Selon la Fédération canadienne des municipalités (FCM, 1996), plus de 44 milliards de dollars (en 1996), soit 1 500 dollars par Canadien, seraient requis uniquement pour la remise en état des infrastructures urbaines. Ailleurs dans le monde, les montants consacrés à l'entretien des structures sont aussi très importants. Ainsi, aux États-Unis, le Congrès a voté, le 22 mai 1998, un budget de 70 milliards de dollars pour la réhabilitation des autoroutes et des ponts pour une durée de cinq ans. Cependant, il est aujourd'hui admis que les coûts des opérations de réfection peuvent être optimisés si l'on dispose de renseignements fiables sur l'état véridique des ouvrages.

Après une discussion sur le rôle de la surveillance dans la gestion des structures, les différentes composantes de cette surveillance seront présentées. Le contrôle non destructif (CND) des ouvrages de génie civil sera ensuite abordé sous différents aspects (principe général des techniques, particularité des matériaux de génie civil, processus général de développement d'une technique). Enfin, un aperçu de quelques activités du Groupe de recherche sur l'auscultation et l'instrumentation (GRAI, université de Sherbrooke, Québec, Canada) dans le domaine du CND des ouvrages de béton et de maçonnerie sera donné.

La surveillance des structures

Rôle de la surveillance dans la gestion des structures

Alors que les exigences pour le maintien en bon état des infrastructures augmentent, les fonds disponibles ne permettent pas la réparation à court terme de toutes les infrastructures en service. Le problème majeur auquel tous les pays sont confrontés est l'identification d'une méthodologie qui permettrait d'investir de la manière la plus efficace qui soit dans les infrastructures (ponts, chaussées, barrages, etc.). En réponse aux besoins sociaux, le concept de la gestion des structures a donc été mis en avant ces dernières années pour résoudre, de façon économique et durable, les nombreux problèmes liés à la sécurité et à la pérennité des structures en service (Zaikoff, 1991). La mise en place d'un tel système repose sur la connaissance précise de l'état actuel des structures. Cette connaissance est essentielle pour identifier les causes, l'étendue et la sévérité des dommages, pour prédire la progression des détériorations dans le temps et, en définitive, pour fournir un outil d'aide à la décision en ce qui concerne les programmes de réparation. Les techniques de surveillance sont donc extrêmement importantes pour les gestionnaires et les propriétaires de structures. Ces techniques exigent un niveau élevé de précision et de fiabilité pour répondre aux besoins actuels et futurs.

Une évaluation erronée peut en effet se traduire par des accidents graves du fait de la non-détection des dégradations, ou donner lieu à la perte d'investissements en cas de travaux de réparation ou de renforcement inutiles si les dommages sont surestimés.

Les composantes de la surveillance

La surveillance des ouvrages de génie civil englobe les trois types d'activités complémentaires suivantes : l'inspection visuelle, l'instrumentation et l'auscultation (ou contrôle non destructif) :

- l'inspection visuelle périodique des structures est une activité primordiale car elle permet de déceler les anomalies de fonctionnement et les signes extérieurs de dégradation. En général, tous les propriétaires et gestionnaires d'ouvrages (barrages, ponts, chaussées, etc.) ont une politique interne d'inspection visuelle ;
- l'instrumentation consiste à équiper la structure d'un ensemble de capteurs (fissuromètres, inclinomètres, etc.) choisis en fonction de la problématique. Ces instruments sont installés à des endroits stratégiques de l'ouvrage de manière à suivre en continu son comportement en conditions réelles de fonctionnement. Ce type de surveillance passive est pratiqué depuis longtemps par les gestionnaires de barrages, compte tenu des conséquences qu'aurait la déstabilisation de ces ouvrages, et est de plus en plus adopté par les gestionnaires d'autres types de structures tels que les ponts ;
- les techniques de contrôle non destructif (CND) consistent à induire une perturbation dans le matériau à étudier et à enregistrer la réponse de celui-ci. La perturbation peut être de nature mécanique, thermique, électrique ou électromagnétique, etc. Théoriquement, la réponse du matériau à l'excitation est fonction de son état. Dès lors, toute la difficulté réside dans l'extraction de l'information concernant l'état du matériau à partir de sa réponse. Différents outils de traitement des données plus ou moins complexes sont employés à cet effet.

Le contrôle non destructif des structures a pour objectif de fournir des renseignements qui ne peuvent être obtenus ni par l'inspection visuelle ni par l'instrumentation. En effet, l'intérêt premier de ce contrôle est d'avoir une évaluation *in situ* de la qualité des matériaux (ex : résistance à la compression, perméabilité aux ions chlorure). En plus de l'estimation des propriétés, les techniques de CND sont aussi utilisées pour répondre à diverses autres questions telles que la détection des fissures, la caractérisation de l'état de corrosion des armatures dans le béton armé, la détermination de l'épaisseur des dalles de béton, etc.

Particularité des CND des ouvrages de génie civil

Les CND sont nés de la nécessité de garantir la sécurité des biens et des personnes. Ainsi, dans les industries aéronautiques ou aérospatiales, les CND sont une pratique ancienne, courante et obligatoire. Chaque élément doit être régulièrement inspecté car toute anomalie non dévoilée représente une menace dont les conséquences peuvent être dramatiques. Il existe une multitude de procédés normalisés relatifs à ce contrôle (Lambert et *al.*, 1994) dont les principaux sont le ressuage, la radiographie, la magnétoscopie, les courants de Foucault, les ultrasons, la thermographie infrarouge et l'émission acoustique. Malheureusement, le génie civil ne peut pas bénéficier de toutes les avancées techniques des CND dans les industries mécaniques car la nature des matériaux employés ainsi que les préoccupations diffèrent.

En effet, les propriétés mécaniques des divers métaux et alliages métalliques sont généralement connues, reproductibles et les variations les plus importantes sont le plus souvent causées par des fissures. Les techniques de CND qui ont été développées pour ces matériaux sont donc essentiellement utilisées pour détecter, localiser et dimensionner ces discontinuités mécaniques. À la différence des métaux, le béton est un matériau composite qui contient à l'origine un grand nombre de défauts sous forme de petites cavités, pores et interstices. Il est aussi un matériau dont les propriétés mécaniques ne sont pas rigoureusement reproductibles, même dans les meilleures conditions. De plus, ces propriétés se dégradent plus ou moins rapidement dans le temps par suite de l'accroissement des charges de service, des conditions climatiques, de la réaction alcali-granulats, etc. Il en résulte que, globalement, seuls l'émission acoustique (EA), la thermographie infrarouge, le ressuage et les techniques de mesure de la vitesse de corrosion (ex : polarisation linéaire) sont utilisés à la fois en génie civil et en génie mécanique. L'EA est notamment utilisée pour la détection de ruptures dans les câbles de ponts suspendus et dans les câbles de précontraintes (Gourmelon et Robert, 1985 ; Culington et *al.*, 2000). La thermographie infrarouge est essentiellement utilisée pour la détection du délaminage dans les dalles des tabliers de ponts (Maser et Roddis, 1990).

Par ailleurs, les techniques de prospection géophysiques (réflexion et réfraction sismiques, gravimétrie, magnétisme, résistivité électrique, diagraphie, etc.) ont initialement été mises au point pour la recherche de ressources naturelles (ex : pétrole, gaz, eau), pour la détection du niveau du rocher, etc. Elles sont appliquées à des milieux de grandes dimensions (les sols et sous-sols) et les interfaces cibles s'étendent sur des surfaces et des profondeurs de plusieurs dizaines de mètres à plusieurs kilomètres (Sharma, 1997). Par contre, les éléments de béton contrôlés sont des dalles, poutres ou colonnes dont les épaisseurs varient d'une vingtaine de centimètres à quelques mètres dans le cas des parements de barrages. Il en résulte que certaines techniques géophysiques ne sont pas pertinentes (ex : gravimétrie) ou ne sont pas réellement exploitables dans le cas des ouvrages de génie civil. Cela peut être attribué à un niveau insuffisant de développement de l'instrumentation (ex : capteurs, sources d'émission) et des techniques de traitement des données et/ou à la nature même des matériaux de construction. C'est, par exemple, le cas de la réflexion sismique (espace-temps) qui, compte tenu des propriétés mécaniques du béton et des géométries considérées, demeure difficile à mettre en œuvre. Il en est de même pour la réfraction sismique qui ne peut être envisageable que dans le cas où la peau du béton souffre d'une altération forte et en profondeur (ex : gel-dégel, incendies). Toutefois, certaines techniques initialement développées en géophysique ont pu être adaptées avec succès pour la résolution de certains problèmes propres au génie civil (ex : radar, résistivité électrique). Quant aux diagraphies, elles sont encore rarement utilisées pour l'investigation des ouvrages de génie civil. Ces outils peuvent certainement être très utiles pour la caractérisation du béton des barrages à partir des nombreux forages existant dans ces ouvrages.

Ainsi, des considérations générales sur les approches et les techniques d'investigation des matériaux naturels ou artificiels indiquent que les outils de CND utilisés pour l'évaluation des ouvrages en béton sont intermédiaires entre ceux de la géophysique et ceux de la métallurgie. Cela peut notamment être illustré par le fait que les fréquences des ondes acoustiques utilisées pour l'étude des sols et des métaux sont de l'ordre du hertz et du mégahertz respectivement, alors qu'elles sont de l'ordre du kilohertz pour le béton. Enfin, l'histoire des CND en génie civil montre que ce domaine d'expertise grandit, qu'il trouve progressivement sa voie et que les recherches effectuées sont généralement de bonne qualité. Ces recherches ont d'ores et déjà donné lieu à des développements fort intéressants tels que, par exemple, la technique de l'impact-écho.

Processus d'évolution d'une technique de CND

Malgré les efforts de recherche et de développement déployés à l'échelle internationale, force est d'admettre que les outils de CND ne sont pas encore totalement acceptés par les ingénieurs et les gestionnaires de structures car les expériences vécues n'ont pas toujours été concluantes. En réalité, ce constat est lié au processus même de développement d'une technique de CND. À partir de ces expériences, (Rawlings, 1975) propose un schéma simplifié fort intéressant rendant compte des fluctuations, au cours du temps, du degré d'intérêt porté à une technique (fig. 1).

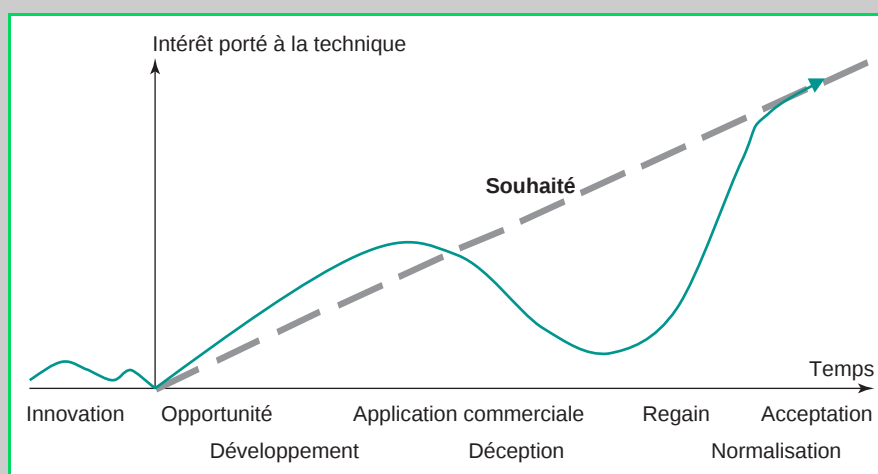


Fig. 1 - Processus de développement d'une technique de CND (Rawlings, 1975).

Lorsqu'une technique de CND apparaît à la suite d'une innovation technologique, elle passe par une première phase de croissance rapide correspondant à de nombreuses tentatives de mises en application plus ou moins réussies et par un développement commercial (matériel, prestations). Cependant, le plus souvent, les limitations des connaissances de base conduisent, de manière systématique, à des échecs plus ou moins répétés car les applications retenues sont généralement prématurées. Ces échecs amènent les scientifiques à reprendre les études et les ingénieurs à s'interroger sur des applications plus judicieuses. Une période de croissance stable et contrôlée s'engage alors car les applications retenues sont mises au point avec succès. La nouvelle technique trouve progressivement sa place parmi celles déjà existantes, qu'elle complète, mais qu'elle ne remplace pas. Les normes deviennent alors nécessaires, ce qui permet à la technique d'être enfin reconnue avec ses possibilités et ses limites propres. L'expérience acquise par le passé dans le domaine du CND des métaux avec, par exemple, les techniques radiographiques ou celle de l'émission acoustique montre à chaque fois le même cheminement.

Dans le domaine de la métallurgie, les procédures de normalisation requièrent des délais de l'ordre d'une dizaine d'années. En génie civil, ces procédures sont plus longues et leur durée peut être estimée à vingt ans si l'on se réfère au cas de l'impact-écho ou du radar. Il en résulte qu'à l'heure actuelle, les normes ASTM relatives au CND des ouvrages de béton sont limitées au nombre de douze (tableau I). Cela explique en partie le retard très significatif entre la pratique du CND en génie civil et le génie mécanique.

TABLEAU I
Normes ASTM relatives au CND des ouvrages de génie civil

ASTM C805	Test method for rebound number in concrete
ASTM C803	Test method for penetration resistance of hardened concrete
ASTM C215	Test method for fundamental transverse, longitudinal and torsional frequencies of concrete specimens
ASTM C1040	Test method for density of unhardened and hardened concrete in place by nuclear methods
ASTM C1202	Test method of electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration
ASTM C597	Test method of pulse velocity through concrete
ASTM C1383	Test method for measuring P-wave speed and thickness of concrete plates using the impact-echo method
ASTM D4748	Test method for determining the thickness of bound pavement layers using short pulse radar
ASTM C876	Test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete
ASTM D4580	Practice for measuring delaminations in concrete bridge decks by sounding
ASTM D4788	Test method for detecting delaminations in bridge decks using infrared thermography
ASTM D6087	Test method for evaluating asphalt-covered concrete bridge decks using ground penetrating radar

Activités du GRAI dans le domaine des CND des ouvrages de génie civil

Les premières recherches sur les applications des techniques de contrôle non destructif entreprises par le Groupe de Recherche sur l'Auscultation et l'Instrumentation (GRAI, université de Sherbrooke) datent de 1985. Ces recherches étaient initialement axées sur l'étude en laboratoire des mécanismes de rupture des roches. Afin de définir au mieux les dimensions des zones endommagées et de préciser les processus d'initiation et de propagation de l'endommagement, l'émission acoustique avait été utilisée dans le cadre d'essais spécifiques (Feknous et *al.*, 1989 ; Bouja et *al.*, 1991). Au début des années 1990, les activités du GRAI ont évolué progressivement vers le développement et la validation *in situ* de techniques de CND afin de répondre aux préoccupations des gestionnaires de structures. Un aperçu de quelques activités réalisées au cours de la dernière décennie est présenté dans les sections suivantes.

Application de la tomographie acoustique au contrôle de la qualité des travaux d'injection

La tomographie acoustique est une technique d'imagerie qui consiste à faire se propager des ondes acoustiques à travers le milieu ausculté et à traiter les données recueillies au moyen d'outils mathé-

matiques d'inversion (Côte et *al.*, 1992). Le résultat obtenu est généralement une représentation spatiale, en 2D ou en 3D, des variations de la vitesse de propagation des ondes au sein de la section ou du volume ausculté. Ce type de représentation est très intéressant car il rend le milieu « transparent » et permet de déterminer les variations des propriétés mécaniques dans le milieu (module d'élasticité, densité), révélant ainsi les zones de faiblesse qui nécessitent plus d'investigation ou/et des travaux de réparation.

Les études sur les possibilités et les limites de la tomographie acoustique ont été initiées en 1991 dans le cadre d'une collaboration avec le LCPC (Centre de Nantes) et ont fait l'objet d'expérimentations aussi bien en laboratoire que sur des ouvrages en service (Kharrat et *al.*, 1995 ; Saleh et *al.*, 1997). Ainsi, une évaluation de la qualité des travaux de réparation par injection au moyen de cette technique a notamment été effectuée sur un pilier du pont Victoria (Montréal) dont la construction date de 1887 (Perret et *al.*, 2002). Les parois des piliers de cette structure sont constituées de pierres de maçonnerie calcaire et le cœur est formé de matériaux de remplissage (remblai, blocs de roches). Les dégradations observées sur le pilier injecté (fig. 2) étaient principalement des fissures d'environ 0,5 mm d'ouverture dans les pierres de maçonnerie, une érosion des joints au niveau de la zone de marnage et une fissuration du mortier des joints. Ces derniers, d'une épaisseur de 12 à 25 mm, présentaient une détérioration pouvant atteindre 30 cm de profondeur. Une réfection par injection de coulis de ciment a été jugée nécessaire pour réduire l'érosion et le lessivage des joints et ainsi améliorer le comportement structural du pilier.

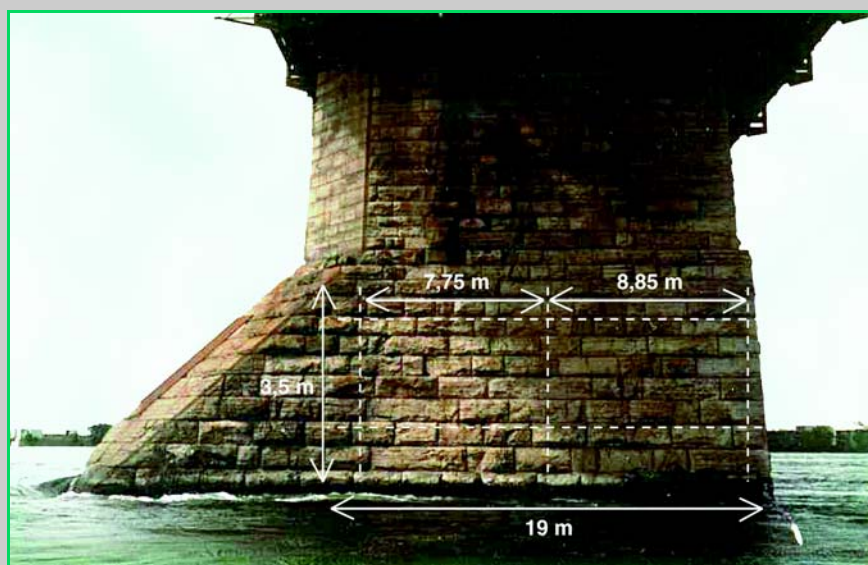


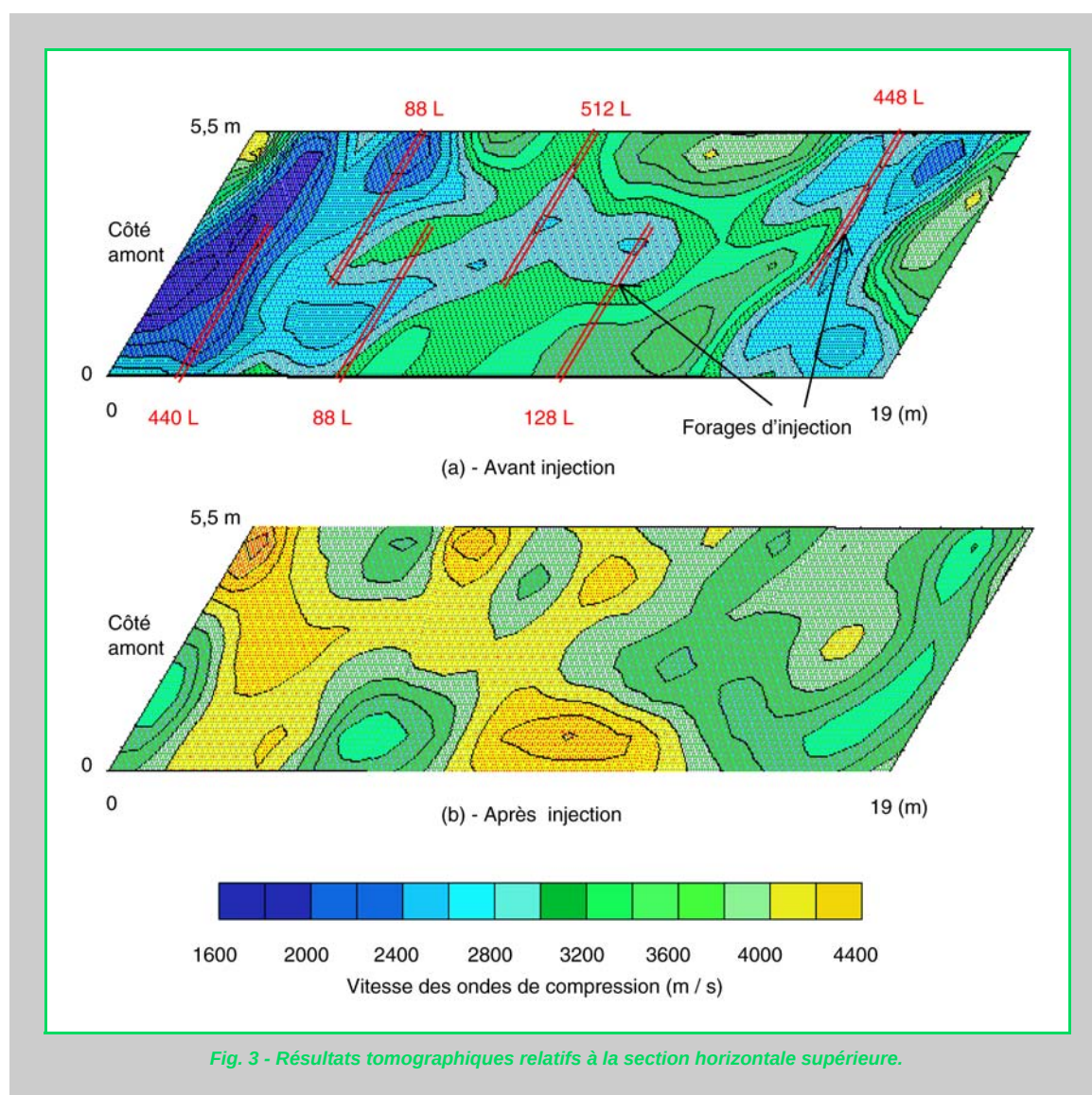
Fig. 2 - Configuration des mesures tomographiques.

L'auscultation du pilier a été effectuée aussi bien avant qu'après les travaux d'injection. Elle a concerné deux sections horizontales et trois sections verticales de dimensions respectives $19\text{ m} \times 5,5\text{ m}$ et $3,5 \times 5,5\text{ m}$ (fig. 2). Ces sections avaient été choisies à différents emplacements de manière à obtenir des résultats représentatifs de l'état du pilier. L'émission des ondes a été effectuée à l'aide d'un marteau d'acier (500 g) et la réception à l'aide d'une série de 24 géophones espacés de 50 cm. L'acquisition des données a été réalisée à l'aide du système Terraloc Mark 6 d'ABEM avec une fréquence d'échantillonnage de 40 kHz et une résolution sur les amplitudes de 16 bits. Le nombre total de mesures (durée de propagation des ondes de compression) collectées à travers le volume ausculté était de 1 456 mesures. L'inversion de ces données, effectuée à l'aide du logiciel 3DTOM (Jackson et Tweeton, 1996), a permis d'obtenir les variations de la vitesse de propagation des ondes de compression au sein des cinq sections.

Les résultats tomographiques obtenus avant injection ont montré que la vitesse de propagation moyenne des ondes dans le pilier était de 3 100 m/s. Cette valeur est inférieure à celle généralement

mesurée dans les roches calcaires (3 400 m/s à 6 000 m/s (Sharma, 1997)) car le cœur du pilier est constitué de matériau de remplissage. Les vitesses moyennes les plus faibles sont observées dans la section verticale située du côté amont (2 600 m/s) ainsi que dans la section horizontale supérieure (2 950 m/s). L'image tomographique relative à cette dernière section (fig. 3a) indique que la vitesse de propagation se situe dans l'intervalle 2 000 m/s – 3 600 m/s, les plus faibles vitesses ($V < 2\,900$ m/s) étant localisées aux extrémités amont et aval du pilier ainsi que dans la partie centrale. Ce résultat a permis de préciser les emplacements de six forages d'injection dans cette section afin d'en améliorer les propriétés élastiques. Ces forages, d'une longueur de 3,5 m, ainsi que les quantités de coulis injectées dans chaque forage sont également indiqués sur la figure 3a. Il est alors possible de constater que les forages qui ont absorbé le plus de produits d'injection sont ceux situés du côté amont (440 litres), du côté aval (448 litres) ainsi que le forage situé au centre de la section (512 litres).

La deuxième phase des essais tomographiques a concerné les mêmes sections que celles considérées avant l'injection et a eu lieu sept jours après les travaux, une fois le coulis suffisamment durci. Ces essais ont révélé une augmentation globale de la vitesse de propagation (fig. 3b). Celle-ci varie en effet entre 3 400 m/s et 4 400 m/s (moyenne : 3 900 m/s) alors qu'elle était comprise entre 2 000 m/s et 3 600 m/s avant l'injection. Par ailleurs, l'écart-type des mesures a également été réduit, passant de 990 m/s avant l'injection à 600 m/s après l'injection, ce qui témoigne d'une amélioration de l'homogénéité du milieu.



Application de L'ASOR à l'évaluation de l'état du béton proche de la surface

La dégradation des structures de béton est initiée à la surface (peau du béton) car c'est le matériau de surface qui souffre le plus du gel-dégel, des cycles thermiques, des eaux acides, etc. La propagation en volume de ces dégradations est progressive et concerne généralement des épaisseurs de béton allant de 10 à 20 cm. Dans certains cas, l'épaisseur du béton endommagé peut dépasser le mètre.

Dans la pratique, la réparation des ouvrages présentant des dommages dans la peau consiste à remplacer les matériaux plus ou moins endommagés par des matériaux nouveaux. Une question se pose alors concernant la sévérité des dommages observés en surface et leur étendue en profondeur. Ces renseignements sont importants car une surestimation de l'épaisseur du matériau endommagé engendre des surcoûts de réparation et sa sous-estimation peut affecter sérieusement la durabilité de ces réparations (risques de décohésion entre le béton original et le béton de réparation). Le développement d'outils de CND permettant de disposer de telles données est, à l'heure actuelle, l'un des besoins exprimés par les gestionnaires de structures.

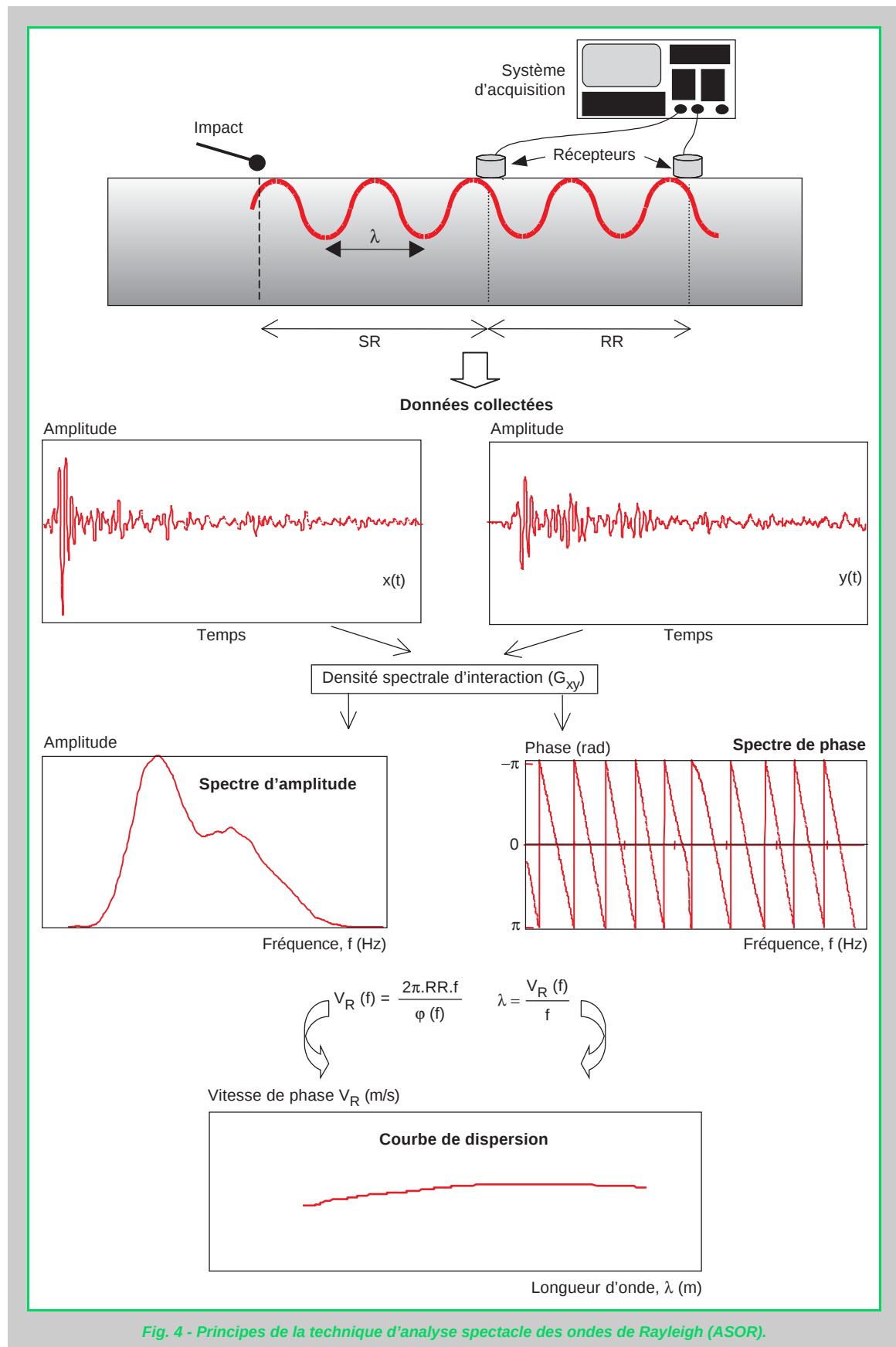
Parmi l'ensemble des procédés de CND disponibles, l'analyse spectrale des ondes de Rayleigh (ASOR) apparaît comme le plus adapté pour répondre à cette problématique. Cette technique acoustique ne requiert l'accès qu'à une seule face du milieu et est utilisée depuis de nombreuses années pour la caractérisation des sols, des chaussées (Stokoe et *al.*, 1994) et des milieux stratifiés, particulièrement favorables à la dispersion des ondes de Rayleigh. Le succès de ces travaux a naturellement incité le GRAI à mener une recherche afin d'étudier les possibilités de cette technique pour évaluer l'état du béton proche de la surface (Hassaim et *al.*, 2001 ; Rhazi et *al.*, 2000). Le programme expérimental s'est notamment attaché à explorer la corrélation entre la vitesse de propagation des ondes de Rayleigh et les propriétés élastiques du béton et à déterminer la sensibilité de ces ondes aux variations en profondeur des propriétés du béton. Les résultats de ces investigations sont exposés après l'introduction suivante aux ondes de Rayleigh.

Les ondes de Rayleigh sont une combinaison complexe d'ondes longitudinales et transversales. Le mouvement des particules associé à ces ondes décrit une ellipse de grand axe vertical et est confiné dans une zone proche de la surface. L'amplitude de ce mouvement s'atténue exponentiellement avec la profondeur et devient négligeable à une certaine profondeur proportionnelle à la longueur d'onde (λ). Différentes valeurs de ce facteur de proportionnalité sont proposées dans la littérature : 0,33 (Heisy, 1982), 0,5 (Heukelom et Foster, 1960) et 1 (Ballard, 1964). Quelle que soit la valeur de ce facteur, les différentes longueurs d'ondes d'une onde de Rayleigh se propagent avec la même vitesse si le milieu est semi-infini, homogène et isotrope. Par contre, dans le cas d'un milieu stratifié, les différentes longueurs d'ondes ne se propagent pas avec la même vitesse et l'onde est dite dispersive. Cette dispersion est causée par le fait que les faibles longueurs d'ondes (correspondant aux hautes fréquences) se propagent dans les couches superficielles et sont donc affectées uniquement par les propriétés de ces couches, alors que les grandes longueurs d'ondes sont plutôt perturbées par les propriétés des couches profondes. C'est ce phénomène de dispersion qui est exploité pour établir le profil des propriétés élastiques du milieu ausculté en fonction de la profondeur.

En 1994, Stokoe et *al.* (Stokoe et *al.*, 1994) ont publié un article qui explique tous les détails du mode opératoire de l'ASOR et dont la synthèse est présentée sur la figure 4. D'une façon générale, l'acquisition des ondes de Rayleigh requiert une source d'émission d'ondes et deux récepteurs identiques. La dispersion de ces ondes (variation de la vitesse en fonction de la longueur d'onde) est déterminée à partir du déphasage entre les mouvements vibratoires du milieu au niveau des deux récepteurs. Cela est obtenu par le calcul de la densité spectrale d'interaction G_{xy} des deux signaux collectés ($x(t)$ et $y(t)$). Cette fonction mathématique est caractérisée par son spectre d'amplitude et par son spectre de phase. Le spectre d'amplitude est le produit des spectres d'amplitude des deux signaux collectés et renseigne sur la distribution fréquentielle de l'énergie commune à ces signaux. Le spectre de phase donne le déphasage $\phi(f)$ entre $x(t)$ et $y(t)$ pour chaque fréquence f . La vitesse de propagation $V_R(f)$ est alors calculée à partir de $\phi(f)$ pour chaque fréquence ainsi que la longueur d'onde λ , selon les équations de la figure 4.

Les expérimentations menées pour étudier la corrélation entre les ondes de Rayleigh et les propriétés du béton ont été réalisées sur trois dalles (longueur : 1,50 m, largeur : 1 m, hauteur : 0,50 m). Les modules d'Young des bétons qui ont servi à la fabrication de ces dalles étaient, à vingt-huit jours, respectivement de 24 GPa, 30 GPa et 35 GPa. Les mesures ont été réalisées au centre des dalles et

selon les diagonales afin de minimiser les réflexions provenant des frontières géométriques des dalles. L'émission des ondes a été réalisée par impact d'une bille en acier de diamètre 13 mm et la réception au moyen de deux accéléromètres (PCB modèle 353B61). La distance entre la source et



le récepteur le plus proche, ainsi que la distance entre les deux récepteurs, étaient de 0,45 m. Un programme de traitement des données a été mis au point durant ces études. Ce programme permet notamment d'extraire les ondes de Rayleigh des données brutes en éliminant les ondes de volume et les arrivées tardives par l'application de filtres de type Kaiser et exponentiel.

La figure 5a donne les courbes de dispersion associées aux trois dalles étudiées. L'intervalle des longueurs d'onde considérées a été limité à des valeurs de l'ordre de 0,40 m afin de ne pas tenir compte des grandes longueurs d'onde qui interagissent avec les faces inférieures des dalles. La borne inférieure de cet intervalle ($\lambda \approx 0,07$ m) a été dictée par la fréquence maximale de la source d'émission utilisée (≈ 25 kHz). Les vitesses moyennes de propagation mesurées sont de l'ordre de 1900 m/s, 2100 m/s et 2350 m/s respectivement. Ces vitesses d'ondes de Rayleigh sont comparables aux valeurs mesurées par d'autres chercheurs sur des bétons de ciment (ex. Hévin *et al.*, 1998 ; Krstulovic *et al.*, 1996) et reflètent bien les différences en ce qui concerne la qualité des bétons des dalles testées.

L'analyse des courbes de dispersion indique aussi que les vitesses des ondes de Rayleigh subissent une augmentation plus ou moins significative en fonction de la longueur d'onde ce qui, théoriquement, traduit une amélioration des propriétés mécaniques en fonction de la profondeur. Le plus important taux d'augmentation de la vitesse est observé dans le cas du béton le moins rigide (24 GPa), alors qu'il est relativement faible dans le cas du béton le plus rigide (35 GPa) et est intermédiaire dans le cas du béton de 30 GPa (fig. 5a). Ce constat suggère que l'étude de la dispersion des ondes de Rayleigh peut donner des renseignements utiles sur le profil des propriétés en fonction de la profondeur, même lorsque ces propriétés varient de façon très progressive.

La figure 5b donne la courbe de dispersion obtenue en laboratoire sur une dalle de béton simulant des variations brusques du module d'Young en fonction de la profondeur. Ce modèle est constitué d'une couche inférieure d'un béton dont le module d'Young est de 35 GPa (épaisseur : 0,35 m), une couche intermédiaire d'un béton de 30 GPa (épaisseur : 0,20 m) et d'une couche superficielle d'un béton de 24 GPa (épaisseur : 0,15 m). La procédure expérimentale suivie est la même que celle décrite plus haut. La courbe de dispersion peut être décomposée en trois parties mettant en évidence les trois couches successives de béton de qualité différente. La première partie de la courbe est déterminée par la propagation des faibles longueurs d'onde ($\lambda < 15$ cm) dans la couche superficielle. La vitesse de propagation dans cette couche est approximativement constante et est de l'ordre de 2 000 m/s. À la longueur d'onde $\lambda = 0,15$ m (frontière entre les deux premières couches), une augmentation de la vitesse de propagation est observée dans la courbe de dispersion, traduisant ainsi la présence d'un milieu sous-jacent de meilleures propriétés mécaniques. La frontière entre les deuxième et troisième couches est également mise en évidence sur la courbe de dispersion par une augmentation de la vitesse à partir de $\lambda = 35$ cm. Il est à signaler que la courbe de dispersion donnée sur la figure 5b n'est pas inversée. Il en résulte que la vitesse de propagation dans la deuxième couche est une vitesse moyenne qui intègre les propriétés des deux premières couches. De même, la vitesse de propagation des ondes de Rayleigh dans la troisième couche est affectée par les propriétés de l'ensemble des couches. La détermination des vitesses de propagation réelles dans chacune des couches nécessite l'inversion de la courbe de dispersion. Cela n'a pas été jugé nécessaire dans le cadre de cette étude préliminaire car la courbe de dispersion à l'état brut permet d'avoir des renseignements pertinents quant à l'amélioration des propriétés mécaniques du béton en fonction de la profondeur, et cela sans avoir recours à des moyens additionnels de traitement.

Le résultat de la figure 5b indique que la propagation des ondes de Rayleigh est sensible à une épaisseur du matériau de l'ordre d'une longueur d'onde, et est donc davantage en accord avec les résultats de Ballard (1963) qu'avec ceux de Heisy (1982) et de Heukelom et Foster (1960). Ce constat est également corroboré par des investigations menées par Cao *et al.* (2001) sur une dalle constituée de trois couches de mortier ainsi que par d'autres expérimentations réalisées par les auteurs sur l'aptitude de l'ASOR à détecter les vides dans la masse du béton (Hassaim *et al.*, 2001).

Les recherches du GRAI se poursuivent dans ce domaine, compte tenu des résultats plutôt intéressants obtenus dans le cadre de cette étude exploratoire. Les orientations privilégiées concernent la constitution d'une banque de données permettant l'établissement d'une relation entre la vitesse de propagation des ondes de Rayleigh et les propriétés mécaniques du béton, la mise au point d'une source d'émission autorisant la caractérisation des premiers centimètres du béton sous la surface et le développement de la tomographie en ondes de Rayleigh.

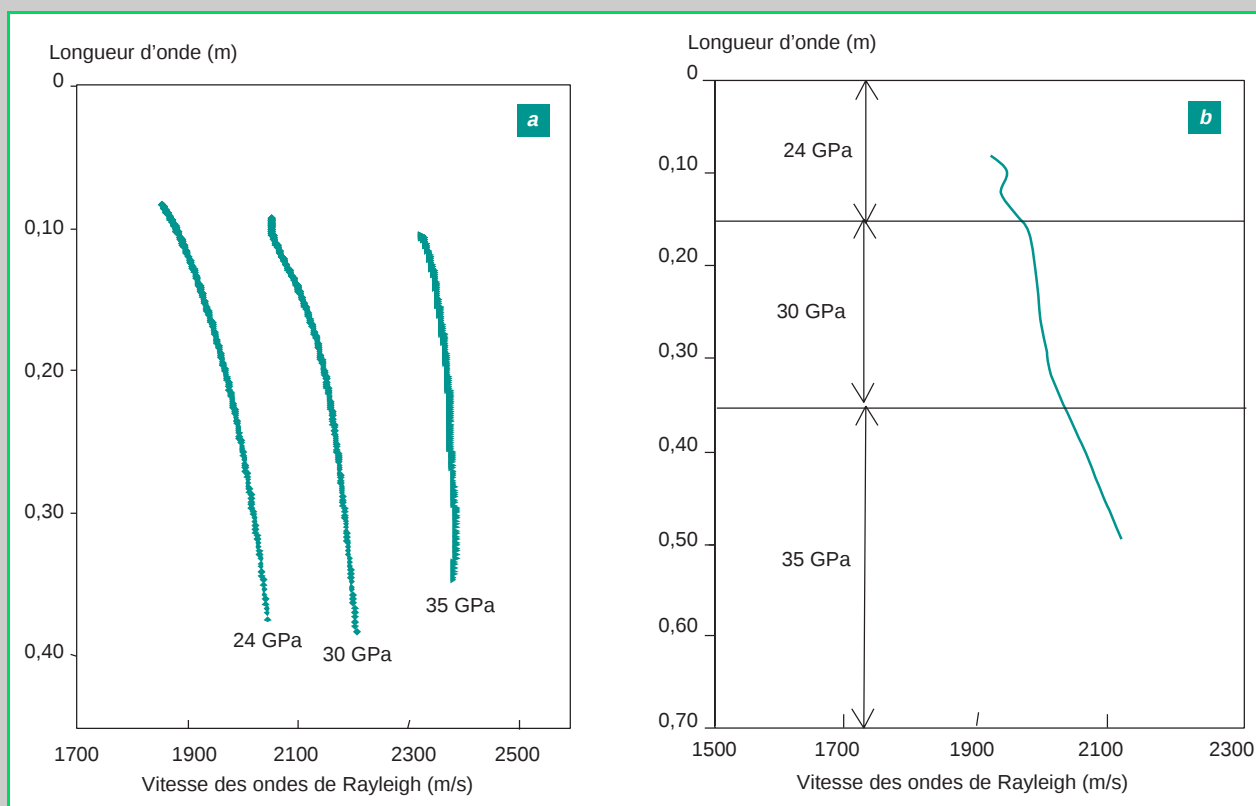


Fig. 5 - Résultats d'ASOR obtenus sur les blocs homogènes (a) et sur le bloc multicouche (b).

Le CND des dalles des tabliers de ponts

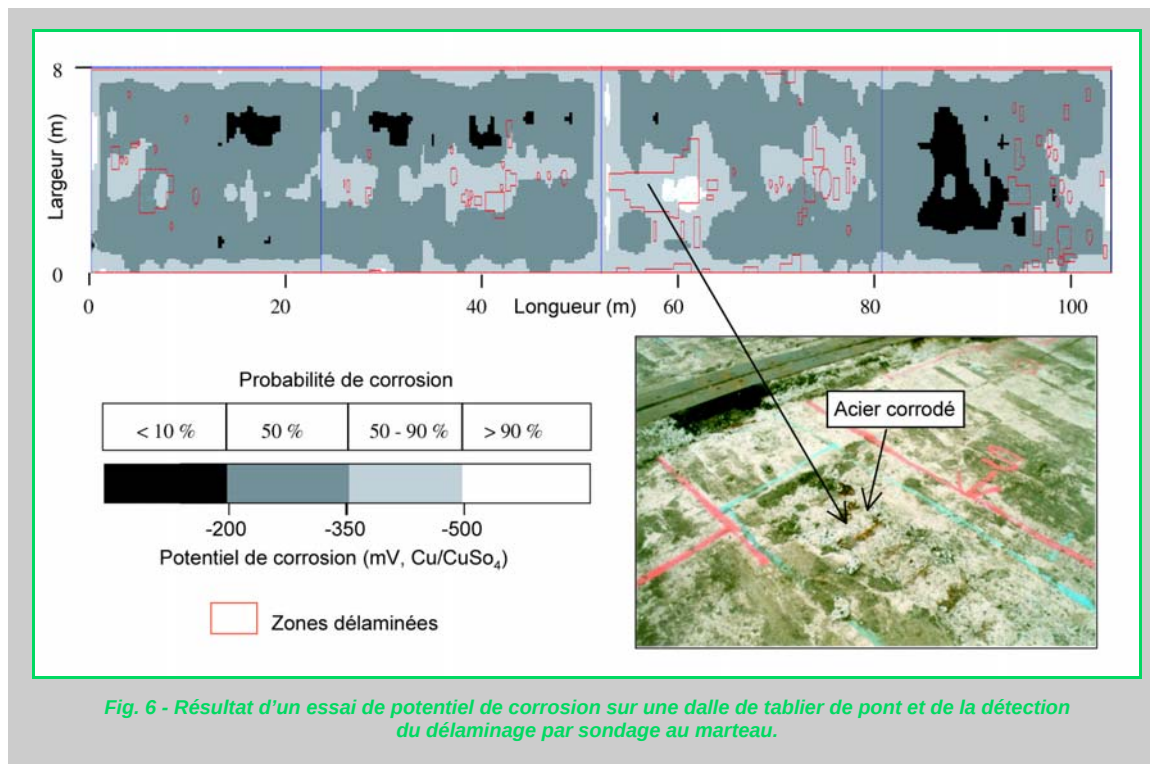
Au Canada, la corrosion des aciers d'armature est la principale cause de dégradation des dalles des tabliers de ponts en béton armé. Lorsque cette corrosion atteint un certain stade d'avancement, elle provoque l'apparition de fissures (délamination) au niveau des aciers d'armature. Les gestionnaires des ponts sont donc intéressés par l'utilisation de techniques de CND afin, dans un premier temps, de pouvoir répertorier les ponts selon le degré de dégradation et de planifier ainsi les réparations (évaluation au niveau réseau) et, par la suite, de quantifier plus précisément la superficie à réparer des tabliers dégradés (évaluation au niveau projet).

CND des dalles des tabliers de ponts par l'essai de potentiel de corrosion

En Amérique du Nord, l'essai de potentiel de corrosion (ASTM C876, tableau 1) est fréquemment utilisé par les ingénieurs pour évaluer l'état de corrosion des aciers au carbone non revêtus dans les dalles des tabliers de ponts. L'essai consiste à mesurer la différence de potentiel électrique entre les armatures et une électrode de référence en contact avec le béton par le biais d'un trou (diamètre ≈ 1 cm) foré à travers le béton bitumineux et rempli d'une solution conductrice.

La figure 6 présente un résultat d'essai de potentiel de corrosion réalisé sur une dalle de tablier de pont à l'aide d'une demi-cellule de cuivre/sulfate de cuivre. Contrairement aux recommandations de la RILEM (Raharinaivo, 2001) qui considèrent que le but de l'essai est de localiser les zones de corrosion, le résultat présenté ici sous la forme d'une cartographie du potentiel est interprété en terme de probabilité de corrosion selon les spécification de la norme ASTM C876. Les zones de forte probabilité de corrosion (potentiel < -350 mV) sont situées au centre du tablier ainsi que sur les bords et occupent 44 % de la superficie de la dalle. La cartographie de la figure 6 indique également les zones délaménées du tablier et déterminées par un sondage au marteau après que le revêtement d'asphalte ait été enlevé (ASTM D4580, tableau 1). Bien qu'il n'existe pas de lien direct entre l'état de corrosion et l'existence du délamination, force est de constater qu'une assez bonne corrélation est observée entre les résultats du potentiel de corrosion et les zones délaménées.

Au Québec, l'essai de potentiel de corrosion est jugé satisfaisant par les ingénieurs des structures. Toutefois, la collecte des données nécessite la fermeture des ponts, ce qui est réellement problématique dans les grands centres urbains tels que la ville de Montréal. Par ailleurs, le coût des essais est en progression constante et a parfois atteint 12 \$CAN/m² en 2001. Les ingénieurs privilégient donc l'utilisation de techniques alternatives et plus économiques comme le radar.



CND des dalles des tabliers de ponts par radar

La technique radar consiste à transmettre une onde électromagnétique dans le milieu ausculté et à détecter les réflexions qui se produisent lorsque l'onde incidente rencontre un contraste de propriétés diélectriques (Maser et Roddis, 1990). Cette technique est utilisée depuis la fin des années 1970 pour l'évaluation des dommages (délaminage, désagrégation) dans les dalles des tabliers de ponts. Elle est non destructive, peu coûteuse (≈ 3 \$ CAN /m²) et rapide car les relevés peuvent être effectués à partir d'un véhicule mobile, ce qui élimine les coûts indirects associés à la mobilisation des structures (ex : signalisation, détournement du trafic). Toutefois, la fiabilité de cette technique est jugée « flottante » et pas toujours satisfaisante. Cette problématique a incité le GRAI et le Laboratoire des Matériaux et Durabilité des Constructions (INSA de Toulouse) à mener une étude sur les capacités réelles du radar à détecter les dommages dans les dalles des tabliers de ponts (Rhazi et *al.*, 2000).

D'une façon générale, la qualité des prédictions d'une technique de CND fait intervenir, en premier lieu, la capacité de l'équipement utilisé à mettre en évidence les discontinuités recherchées (interfaces) dans un milieu donné. La fiabilité de l'auscultation est en effet fortement dépendante de la qualité initiale des relevés, et cela quel que soit le type de post-traitement appliqué à ces relevés.

La recherche a donc comporté une étude comparative concernant la performance des antennes radar les plus utilisées pour l'évaluation de l'état des dalles des tabliers de ponts. Ces équipements étaient les suivants :

- équipement A : radar GSSI SIR 10 avec des antennes de type dipôle couplées au sol de fréquence centrale égale à 1,5 GHz ;
- équipement B : radar Pulse EKKO 1000 avec des antennes de type dipôle couplées au sol de fréquence centrale égale à 1,2 GHz ;

- équipement C : radar GSSI SIR 10A avec des antennes de type Cornet (≈ 30 cm du sol) de fréquence centrale égale à 1 GHz ;
- équipement D : radar Penetradar PS-24 avec des antennes de type Cornet (≈ 30 cm du sol) de fréquence centrale égale à 1 GHz.

Les relevés radar obtenus à l'aide de ces différentes antennes ont été collectés le même jour et suivant des lignes de mesure identiques (profils) sur une dalle d'un tablier de pont avec revêtement en béton bitumineux. La performance des équipements testés a simplement été évaluée selon la visibilité des interfaces dans les relevés (revêtement bitumineux-béton de ciment, béton de ciment-armature supérieure, béton de ciment-armature inférieure et béton de ciment-air). La figure 7 donne des signaux typiques enregistrés à l'aide des quatre équipements. Aucun traitement n'a été appliqué à ces signaux, de manière à pouvoir juger de la qualité des données brutes.

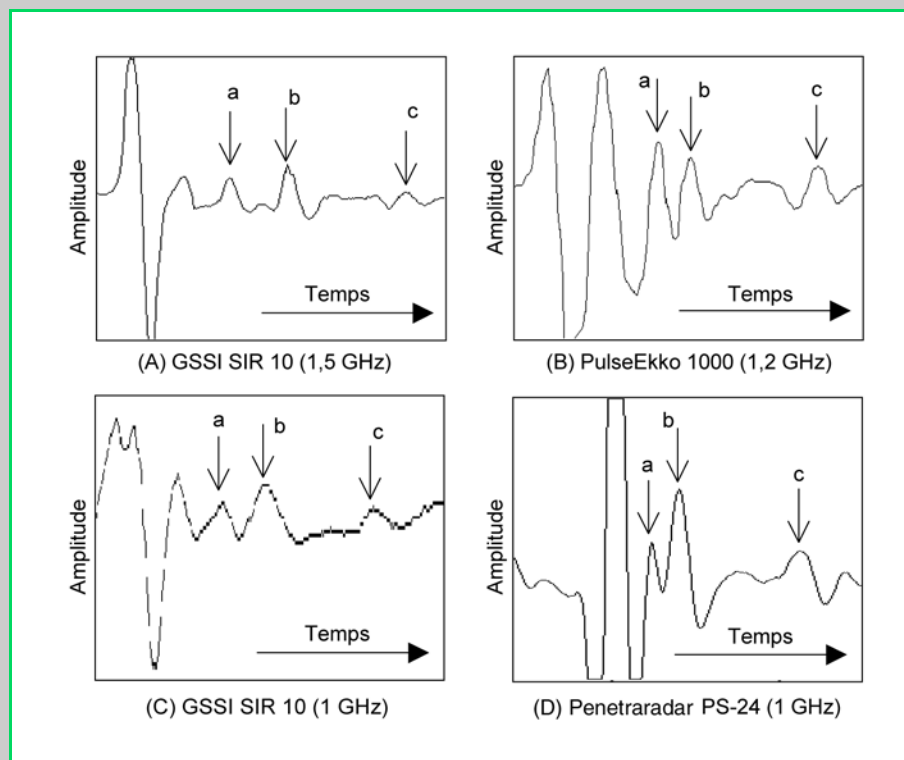


Fig. 7 - Signaux radar typiques obtenus à l'aide des équipements testés. (a). Réflexion à l'interface béton bitumineux-béton de ciment. (b). Réflexion à l'interface béton de ciment-armature supérieure. (c). Réflexion à l'interface béton de ciment-armature inférieure.

La réflexion des ondes radar sur les trois premières interfaces (surface supérieure de la dalle béton, armatures supérieure et inférieure) est visible sur tous les signaux, mais cette visibilité est plus élevée pour l'équipement A. Pour cet équipement, l'écho de surface (le 1er cycle et demi) est nettement dissocié de la réflexion sur la dalle de béton et celle-ci est également dissociée de la réflexion sur l'armature supérieure. Pour le système B, l'écho de surface est plus long (les deux premiers cycles) et n'est pas dissocié de la réflexion sur la dalle de béton. De même, la réflexion sur la dalle de béton n'est pas dissociée de la réflexion sur l'armature supérieure. Il en résulte que l'identification des différentes interfaces est difficile à partir de la simple visualisation des signaux obtenus à l'aide du radar B. Cette observation est également valable pour les systèmes C et D. Par ailleurs, la réflexion des ondes provenant de la fin de la dalle n'est pas réellement apparente sur les signaux. Cela est fréquemment constaté dans le cas des dalles des tabliers car le béton est souvent contaminé par les ions chlorure, ce qui rend le milieu très atténuant.

La figure 8 donne des exemples de profils radar collectés sur la même ligne de mesure à l'aide des équipements étudiés. L'axe horizontal représente le chaînage (en m) et l'axe vertical représente la

durée de propagation aller-retour des ondes. Ce type de représentation est plus « parlant » car il permet une analyse intégrant plusieurs signaux associés à plusieurs points de mesure. Il confirme la supériorité de la qualité des données obtenues à l'aide de l'équipement A, les réflexions sur les différentes interfaces étant en effet très bien définies. Le radar D donne également des données exploitables car la surface de la dalle est visible sur tout le profil, ce qui n'est pas le cas du système C. Enfin, le profil collecté à l'aide du système B n'est pas satisfaisant ; la surface de la dalle de béton n'est pas toujours visible et la définition des armatures est pauvre, compte tenu de la présence de bruit entre les réflexions provenant de ces armatures.

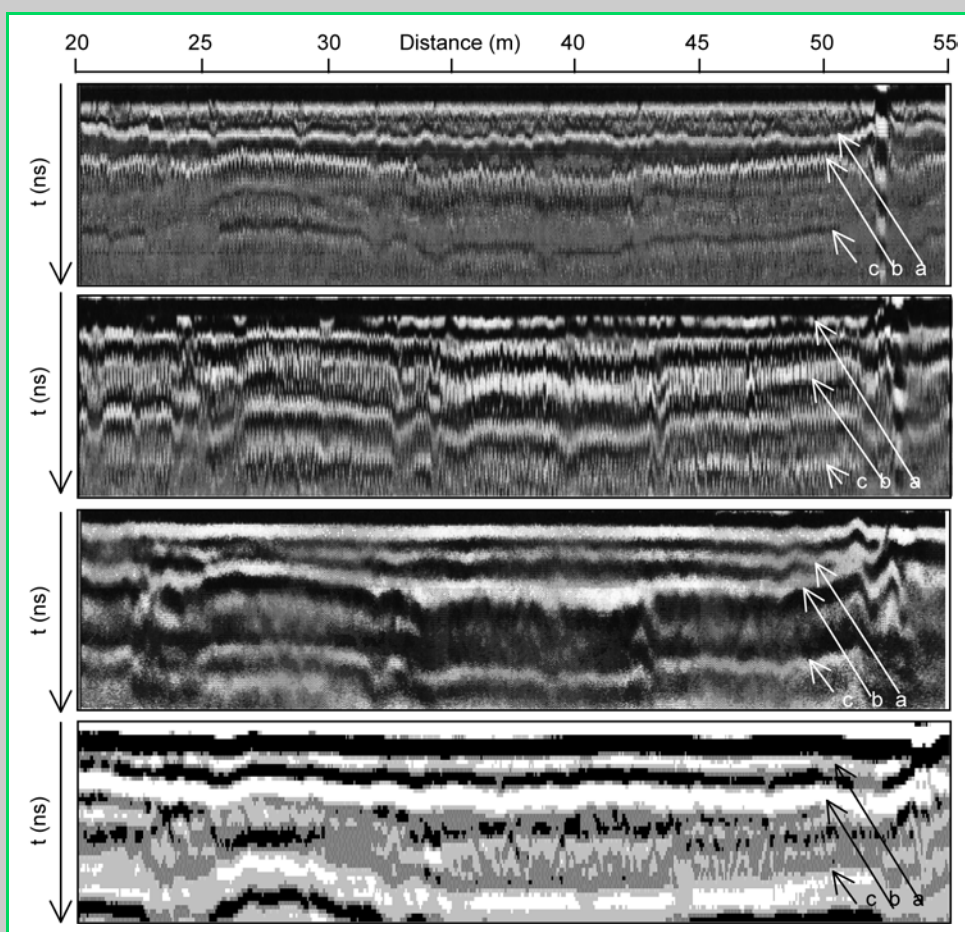


Fig. 8 - Exemples de profils radar collectés à l'aide des équipements testés. De haut en bas : système A, B, C et D.

Cette étude a révélé que des progrès significatifs ont été accomplis dans le domaine de la conception des antennes radar. Elle a permis d'identifier le radar GSSI doté de l'antenne de 1,5 GHz comme étant l'équipement le plus approprié pour l'auscultation des dalles de structures. Les données collectées à l'aide de ce système sont en effet les plus satisfaisantes. Malheureusement, cet équipement ne permet pas non plus de détecter sans ambiguïté une fissure située à quelques dizaines de centimètres de profondeur et dont l'ouverture est de l'ordre du millimètre (à 1,5 GHz, la longueur d'onde d'une onde électromagnétique dans le béton ($\approx 0,06$ m) est largement supérieure à l'ouverture de la fissure). Face à cet obstacle technique, une nouvelle application du radar visant l'évaluation des risques de corrosion a été proposée et validée sur site (Balayssac et *al.*, 2002).

Conclusions

Les obstacles technologiques et scientifiques qui ont longtemps freiné le développement des techniques de CND en génie civil ont été réduits. Un grand pas en avant a été réalisé depuis les deux

dernières décennies car on dispose aujourd'hui d'une panoplie d'outils permettant la résolution d'un certain nombre de problèmes. Certes, tous les besoins ne sont pas encore satisfaits. Par exemple, l'estimation de la résistance à la compression par des techniques de CND constitue encore l'un des objectifs à atteindre car les moyens actuels sont indirects et pas suffisamment fiables. Les efforts de développement doivent donc se poursuivre dans le cadre d'une synergie multidisciplinaire associant des ingénieurs en matériaux et en instrumentation aux physiciens, mathématiciens et informaticiens.

Les techniques de CND offrent des solutions à un problème collectif qui nécessite une approche uniforme et, par conséquent, des standards de normalisation. Cependant, on peut regretter l'absence d'une structure internationale fédérant les actions de développement dans ce domaine. De même, alors que les besoins en ingénieurs spécialisés en techniques de surveillance des ouvrages en service sont flagrants, il est regrettable qu'aucune formation en CND ne soit encore officiellement inscrite dans les programmes académiques de génie civil. Cela affecte la qualité du dialogue entre les professionnels du CND et les ingénieurs civils praticiens et ne contribue pas au développement de ce secteur d'activité (à titre comparatif, les cours de CND ont été introduits dans les programmes de génie mécanique dès le début des années 1970).

Quant aux utilisateurs industriels, déçus par les expériences passées, ils réalisent la pertinence économique des CND et réajustent progressivement leur point de vue. Ce réajustement demeure timide. Le chiffre d'affaire mondial des CND en génie civil est encore faible alors que, seulement aux États-Unis, la vente des équipements de contrôle dédiés aux métaux est estimée à 505 millions de dollars US en 2001. Une acceptation plus concrète des CND en génie civil est à espérer car on ne peut continuer à consacrer les budgets de maintenance à des interventions lourdes, tardives et qui, bien souvent, imposent des interruptions d'usage.

Remerciements. Les travaux présentés dans cette note ont été financés par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) ainsi que par le ministère des Transports du Québec et par Canadian National. Les travaux tomographiques ont été effectués par la compagnie Géophysique GPR International inc.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BALAYSSAC J. P., LAURENS, S., RHAZI, J., Utilisation du radar pour la détection de zones à risque de corrosion dans le béton armé, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **237**, **2002**, pp. 99-102.

BALLARD R.F., *Determination of soil shear moduli at depths by in-situ vibratory techniques*, Miscellaneous Paper 4-691, U. S Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, **1964**, 9 pages.

BOUJA A., BALLIVY G., BENMOKRANE B., PIASTA Z., FEKNOUS N., *The use of acoustic emission technique for identification of failures of tensioned grouted rock anchors*, 32nd US symposium on Rock Mechanics, Oklahoma, États-Unis, éd. J.C. Rogiers, A.A. Balkema, **1991**, pp. 159-168.

CAO Y.S., LIN F.-B., Spectral analysis of surface wave response of multi-layer thin cement mortar slab structures with finite thickness, *NDT & E International*, vol. **34**, **2001**, p. 115-122.

CÔTE Ph., GAUTIER V., PÉREZ A., VANHOOVE J.-P., Mise en œuvre d'auscultations tomographiques sur ouvrages d'art, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **178**, **1992**, pp. 47-54.

CULLINGTON D.W., BRADBURY T., PAULSON P.O., *Continuous acoustic monitoring of steel tendons and cables in bridges*, Bridge Engineering Conference, Guildford, Surrey, UK, April 16-19, **2000**.

FEDERATION OF CANADIAN MUNICIPALITIES & MCGILL UNIVERSITY, *Report on the State of Municipal Infrastructures in Canada*, **1996**, 44 pages.

FEKNOUS N., BALLIVY G., PIASTA Z., *Monitoring of damaged injected rock with acoustic emission*, International Conference on Recent Developments on the Fracture of Concrete and Rock, Cardiff, Angleterre, **1989**, pp. 278-287.

GOURMELON J.-P., ROBERT J.-L., Méthodologie d'auscultation et de surveillance des câbles de ponts suspendus, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **139**, **1985**, pp. 85-91.

HASSAIM M., RHAZI J., BALLIVY G., KHAYAT K., Évaluation de l'état du béton par la technique d'analyse spectrale des ondes de Rayleigh, *Revue Canadienne de génie civil*, vol. **28**, décembre **2001**, pp. 1018-1028.

HEISY J. S., *Determination of in-situ wave velocity from spectral analysis of surface waves*. M. Sc. thesis, Department of Civil Engineering, University of Texas, Austin, **1982**.

- HEUKELOM W., FOSTER C. R., Dynamic testing of pavements, *ASCE Journal of Structural Division*, **86(SM1)**, 1960, pp. 1-29.
- HÉVIN G., ABRAHAM O., PEDERSON, H.A., CAMPILLO M., Characterisation of surface cracks with Rayleigh waves : a numerical model, *NDT& E International*, vol. **31**, 1998, pp. 289-297.
- JACKSON, M. J., AND TWEETON, D. R., *3DTOM – Three-dimensional geophysical tomography*, USBM Report of Investigation 9617, 1996, 52 pages.
- KHARRAT Y., RHAZI J., BALLIVY G., COTE, Ph., Auscultation des structures hydrauliques en béton par tomographie sonore, *Revue canadienne de génie civil*, **22**, 1995, pp. 1072-1083.
- KRSTULOVIC-OPARA N., WOODS R. D., AL-SHAYEA N., Nondestructive testing of concrete structures using the Rayleigh wave dispersion method, *ACI Material Journal*, vol. **93**, 1, janv.-févr. 1996.
- LAMBERT A., RIVENEZ J., WACHÉ G., CHERFAOUI M., *Les contrôles non destructifs*. 3^e éd., Centre technique des industries mécaniques (CETIM, France), 1994, 116 pages.
- MASER K.R., RODDIS W.M.K (1990), Principle of thermography and radar for bridge deck assessment, *J. of Transportation Engineering, ASCE*, vol. **116**, 1990, pp. 583-601.
- PERRET S., KHAYAT K.H., GAGNON E., RHAZI J., Repair of 130-year old masonry bridge using high-performance cement grout, *ASCE Bridge Engineering*, vol. **17**, 2002, pp. 31-37.
- RAHARINAIVO A., *La recommandation RILEM sur la localisation des zones de corrosion métallique par cartographie de potentiel*, séminaire CEFRACOR « Electrochimie et béton armé », 25 janvier 2001.
- RHAZI J., LAURENS S., BALLIVY G., *Insights on the GPR nondestructive testing method of bridge decks*, ACI meeting, Special session on nondestructive detection of corrosion in reinforced concrete, Toronto, oct., 2000, 7 pages.
- RAWLINGS J.G., *ASME acoustic emission code status*, *Acoustic Emission*, ed. Nichols, R.W., Applied Science Publishers Ltd., London, 1975.
- SALEH K., HASSANI F., GUEVREMONT P., SADRI A., LAPOINTE R., BALLIVY G., RHAZI J., KHARRAT Y., Three seismic nondestructive methods used to monitor concrete slab injection tests, *Pure and Applied Geophysics*, vol. **150**, 1997, pp. 605-625.
- SHARMA P. V., *Environmental and engineering Geophysics*, Cambridge University Press, United Kingdom, 1997, 475 pages.
- STOKOE II K.H., WRIGHT G.W., JAMES A.B., JOSE M.R., *Characterization of geotechnical sites by SASW method*, In *Geophysical characterization of sites*, ed. by R. D. Woods, Oxford Publishers, New Delhi, 1994, pp. 15-26.
- ZAIKOFF D.W., *La réfection des centrales et barrages en béton à Hydro-Québec et les défis technologiques*, Comptes rendus du 1er colloque sur la réfection des infrastructures de béton en service, Université de Sherbrooke (Québec, Canada), 1991, pp. 133-155.