

Prévention des risques mécaniques et physiques

Études et recherches

RAPPORT R-806



Méthodes de simulation temporelles pour résoudre des problématiques de bruit et vibrations

Revue de littérature

*Celse Kafui Amédin
Noureddine Atalla
Franck Sgard*



Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

NOS RECHERCHES

travaillent pour vous !

Mission

Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes;

Assurer la diffusion des connaissances et jouer un rôle de référence scientifique et d'expertise;

Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission de la santé et de la sécurité du travail.

Pour en savoir plus

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement. www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine Prévention au travail, publié conjointement par l'Institut et la CSST. Abonnement : www.csst.qc.ca/AbonnementPAT

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
2014
ISBN : 978-2-89631-707-3 (PDF)
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
et de la valorisation de la recherche
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
Télécopieur : 514 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
janvier 2014



Prévention des risques mécaniques et physiques

Études et recherches

■ RAPPORT R-806

Méthodes de simulation temporelles pour résoudre des problématiques de bruit et vibrations

Revue de littérature

Avis de non-responsabilité

L'IRSST ne donne aucune garantie relative à l'exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l'information contenue dans ce document. En aucun cas l'IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l'utilisation de cette information.

Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle.

*Celse Kafui Amédin, Nouredine Atalla
Université de Sherbrooke*

*Franck Sgard
Direction scientifique, IRSST*

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca



Cette publication est disponible
en version PDF
sur le site Web de l'IRSST.

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSST

Les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document
ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

SOMMAIRE

Le bruit et les vibrations affectent quotidiennement des centaines de milliers de travailleurs au Québec. L'exposition au bruit excessif contribue à l'isolement, réduit la coordination et la concentration et augmente donc le risque d'accident et de surdité. Les vibrations peuvent être transmises au corps humain par l'utilisation d'outils vibrants ou par la conduite de véhicules dans des conditions défavorables. Elles peuvent alors générer diverses pathologies qui handicapent la personne affectée. Le bruit et les vibrations constituent donc des nuisances qui peuvent altérer la santé des travailleurs, réduire leur productivité et générer de l'absentéisme. En d'autres termes, ces nuisances engendrent des coûts humains, sociaux et économiques importants.

Dans plusieurs secteurs d'activité professionnelle au Québec comme les mines, la construction, la transformation de métaux, la forêt, l'agriculture, l'aéronautique, la police, etc., les bruits et les vibrations proviennent souvent de phénomènes rapides ou de courte durée de vie (bruits impulsionnels de fort niveau, chocs et impacts d'outils percussifs, rivetage, clouage, forage, explosions...). Divers outils de modélisation ont été développés pour favoriser la réduction du bruit et des vibrations en milieu de travail. Il s'agit toutefois de modèles fréquentiels qui conviennent bien aux phénomènes continus et stationnaires, mais qui ne peuvent traiter efficacement des phénomènes transitoires ou impulsionnels. Pour de tels phénomènes, des modèles conçus dans le domaine temporel seraient plus appropriés puisque ceux-ci serviraient à résoudre les équations de propagation d'ondes et de l'élastodynamique directement dans le temps, en principe sans approximations simplificatrices. De tels modèles serviraient aussi à l'analyse de phénomènes non linéaires que ne peuvent traiter efficacement les méthodes fréquentielles.

Le présent projet a consisté à faire une étude bibliographique des outils de modélisation temporelle et à documenter leurs applications en santé et en sécurité du travail, plus spécifiquement dans la réduction des bruits et des vibrations impulsionnelles transitoires ou non linéaires. La revue de la littérature a couvert près de deux cents documents.

Dans la première partie, les fondements des méthodes temporelles ont été exposés. Leur description générale a été faite et les diverses méthodes de résolution ont été présentées. Deux grandes classes de résolution ont été détaillées : les méthodes élaborées directement dans le domaine temporel, et celles qui procèdent par des transformations dans les domaines de Laplace ou de Fourier. Les avantages et inconvénients des diverses méthodes ont été rapportés, de même que leurs différences et complémentarités avec les méthodes fréquentielles. Un inventaire non exhaustif de codes de calcul basés sur des méthodes temporelles a aussi été dressé.

La seconde partie de l'étude a servi à recenser des applications existantes basées sur des méthodes temporelles en santé et en sécurité du travail. La revue a d'abord été axée sur les applications relatives aux protecteurs auditifs et au système auditif soumis à du bruit impulsionnel. Ensuite, les applications en lien avec les phénomènes non linéaires et les phénomènes transitoires découlant de bruits impulsionnels, chocs et impacts ont été recensées. Enfin, la caractérisation des matériaux poreux par des méthodes temporelles pour une utilisation optimale en contexte transitoire a été ciblée. Il a été constaté que les applications existantes révèlent les potentialités énormes des méthodes temporelles, mais celles-ci semblent encore très

peu exploitées dans des problématiques concrètes de bruit et vibrations en santé et en sécurité du travail (SST).

Au vu de l'étude, il serait opportun de pouvoir tester quelques logiciels commerciaux de modélisation temporelle pour évaluer leurs performances réelles en matière de résolution de problématiques vibroacoustiques générées par des bruits impulsionnels en SST. Les résultats de ces tests permettraient de juger de la pertinence de se doter d'outils de modélisation temporelle appropriés pour l'élimination ou la réduction de bruits et de vibrations de fort niveau en milieu de travail. Les outils numériques aideraient en effet les chercheurs à bien prédire et à améliorer l'efficacité des protecteurs auditifs soumis à des bruits impulsionnels de forte intensité, et à favoriser la réduction des bruits et des vibrations générés par des outils percussifs, entre autres par l'utilisation de matériaux poreux et viscoélastiques mieux caractérisés.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE	I
TABLE DES MATIÈRES	III
LISTE DES TABLEAUX	V
GLOSSAIRE	VII
1. INTRODUCTION.....	1
2. OBJECTIFS.....	3
3. MÉTHODOLOGIE.....	4
4. RÉSULTATS.....	6
4.1 Fondements des méthodes temporelles	6
4.1.1 Description générale des méthodes temporelles	6
4.1.2 Les méthodes de résolution temporelles	6
4.1.2.1 Les méthodes <i>Finite Difference Time Domain</i> (FDTD)	6
4.1.2.2 Les méthodes <i>Time Domain Finite Element Method</i> (TD-FEM)	8
4.1.2.3 Les méthodes <i>Time Domain Boundary Element Method</i> (TD-BEM)	10
4.1.2.4 Les méthodes TD-BEM/FEM.....	13
4.1.2.5 Les méthodes transformées dans le domaine de Laplace ou le domaine de Fourier: T-FEM, T-BEM, T-BEM/FEM et T-FDM.....	14
4.1.2.6 Les méthodes <i>Local Boundary Integral Equations</i> (LBIE).....	17
4.1.3 Différences et complémentarités des méthodes temporelles et fréquentielles.....	19
4.1.4 Inventaire de logiciels de calculs d'analyses temporelles	21
4.2 Applications à quelques problématiques de santé et de sécurité du travail	22
4.2.1 Problématiques de protecteurs auditifs	23
4.2.2 Problématiques liées aux outils percussifs et au bruit impulsionnel (phénomènes transitoires)	25
4.2.3 Application à la caractérisation de matériaux poreux.....	27
5. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	29
BIBLIOGRAPHIE.....	31

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 – Synthèse des méthodes temporelles directes.....	18
Tableau 2 – Tableau comparatif des méthodes directes et des méthodes transformées	19

GLOSSAIRE

BEM	Boundary Element Method
BIEM	Boundary Integral Equation Method
BIRF	B-spline Impulse Response Function
BIS	Boundary Integral Solutions
CPU	Central Processing Unit
DG-FEM	Discontinuous Galerkin Finite Element Method
FD	Finite Difference
FDTD	Finite Difference Time Domain
FEM	Finite Element Method
FFT	Fast Fourier Transform
FMM	Fast Multiple Method
HRIR	Head Related Impulse Response
HRTF	Head Related Transfer Function
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
LBIE	Local Boundary Integral Equations
MLS	Moving Least-Square
PML	Perfectly Matched Layer
PSDT	Pseudo Spectral Domain Time
RPBIE	Retarded Potential Boundary Integral Equations
SPL	Sound Pressure Level
T-BEM	Transformed Boundary Element Method
T-BEM/FEM	Transformed Boundary/Finite Element Method
T-FDM	Transformed Finite Difference Method
T-FEM	Transformed Finite Element Method
TD-BEM	Time Domain Boundary Element Method
TD-FEM	Time Domain Finite Element Method
TD-BEM/FEM	Time Domain Boundary/Finite Element Method
T-LBIE	Transformed Local Boundary Integral Equations
TD-LBIE	Time Domain Local Boundary Integral Equations
TDG-FEM	Time-Discontinuous Galerkin Finite Element Method

1. INTRODUCTION

Au Québec, environ 500 000 travailleurs seraient exposés quotidiennement, et de manière plus ou moins prolongée, à des niveaux intenses de bruit. Cette exposition peut induire des effets sur la santé (surdité, effets extra-auditifs comme la perte de sommeil, le stress, etc.) et sur la sécurité des travailleurs (risques d'accident à cause de problème de communication dans le bruit). La surdité professionnelle constitue la seconde maladie professionnelle en nombre de cas indemnisés par la Commission de la santé et de la sécurité du travail (CSST), environ 1500 chaque année [1]. Les conséquences de cette surdité sont incalculables pour le travailleur atteint car la surdité affecte considérablement sa qualité de vie : les travailleurs se disent stressés, nerveux, fatigués et victimes de troubles du sommeil [2]. De plus, elle limite les rapports de la personne affectée avec son entourage, réduit la coordination et la concentration, peut causer de l'interférence avec la communication, tout en augmentant les risques d'accident en milieu de travail [3]. Par ailleurs, ces conséquences sont énormes pour l'employeur, l'entreprise et la société: l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ) estime de manière conservatrice que le coût annuel de la surdité professionnelle pour le régime d'indemnisation serait de l'ordre de 7,1 millions de dollars [4]. L'Organisation mondiale de la santé (OMS) résume bien les conséquences de ce handicap pour le travailleur et la société en indiquant que « les déficiences auditives et la surdité sont des incapacités graves qui peuvent faire peser une lourde charge sociale et économique sur les personnes et leur famille, les communautés » et aussi que « les coûts liés à la perte d'emplois due aux déficiences auditives peuvent faire peser une importante charge économique sur les pays » [5].

Les vibrations constituent aussi un autre problème important de santé et de sécurité dans divers lieux de travail au Québec (mines, agriculture, ateliers mécaniques, exploitations forestières, construction, transport...). Elles peuvent être transmises aux membres supérieurs par l'utilisation d'outils vibrants tels que les outils percussifs, les marteaux-piqueurs, les meuleuses, les perceuses, les tondeuses, les décapeurs, les scies à chaînes... Elles peuvent entraîner des pathologies comme l'arthrose du coude ou des atteintes vasculaires (syndrome de Raynaud), neurologiques ou musculo-squelettiques [6]. Elles peuvent aussi être transmises au corps lors de la conduite de véhicules (camions, autobus, chariots élévateurs, tracteurs et autres engins agricoles, grues, engins de terrassement, hélicoptères...). Les transmissions au corps peuvent causer des maux de dos (lombalgies), des pathologies diverses du cou et des épaules, des traumatismes de la colonne vertébrale ou une hernie discale [7], [8].

Dans plusieurs secteurs d'activité professionnelle au Québec comme les mines, la construction, la transformation de métaux, la forêt, l'agriculture, l'aéronautique, la police, les bruits et les vibrations proviennent souvent de phénomènes à courte durée de vie: bruits impulsionnels de fort niveau, chocs et impacts d'outils percussifs, rivetage, clouage, forage, explosions... Plusieurs centaines de milliers de travailleurs de ces secteurs sont ainsi susceptibles d'être affectés par ces phénomènes qui sont caractérisés par une réponse impulsionnelle de courte durée et donc par un contenu fréquentiel à très large bande.

L'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) et certains de ses partenaires dont le Groupe d'acoustique de l'Université de Sherbrooke (GAUS), ont réalisé dans le passé plusieurs travaux de recherche scientifique qui ont contribué à la réduction des niveaux

de bruit et de vibrations dans les lieux de travail [9]–[18]. Ces travaux ont essentiellement porté sur l'utilisation de méthodes fréquentielles (spectrales), qui conviennent particulièrement à des phénomènes continus et stationnaires ou à des excitations périodiques. Les méthodes spectrales permettent d'analyser le contenu fréquentiel de l'excitation et d'identifier ensuite la réponse fréquentielle des phénomènes étudiés. Elles ne conviennent donc pas à une résolution efficace des problèmes de bruit et de vibrations résultant de sources transitoires ou impulsionnelles. Une description de ces phénomènes dans le domaine fréquentiel est coûteuse et parfois approximative, vu que le domaine fréquentiel à couvrir est très étendu (à très large bande). Il peut donc être plus judicieux d'analyser certains problèmes par des méthodes de résolution temporelles, en les décrivant directement dans le temps à partir de leurs équations gouvernantes, des conditions aux frontières et des conditions initiales.

Les méthodes temporelles sont aussi susceptibles de mieux décrire les comportements non linéaires (par exemple: réponse d'un matériau sous l'effet d'une excitation de très fort niveau, ou propagation d'une onde de choc...). Les méthodes fréquentielles ne peuvent pas décrire exactement ces phénomènes puisque c'est le principe de linéarité inhérent à ces méthodes qui permet la conversion de la variable temps en variable fréquence par le biais de la transformée de Fourier. Pour appliquer une méthode spectrale, il faut faire des approximations et utiliser des outils mathématiques complexes pour décrire les lois de comportement et la réponse, alors que l'application d'une méthode dans le domaine temporel est *a priori* naturelle : aucune hypothèse n'est requise, à part l'exactitude du modèle mathématique utilisé et la disponibilité d'outils de résolution (analytiques ou numériques).

Les méthodes de résolution temporelles semblent donc mieux adaptées pour résoudre les problèmes de nature impulsionnelle et/ou transitoire et les phénomènes non linéaires. Elles pourraient servir, par exemple, à prédire l'atténuation de protecteurs auditifs soumis à des bruits impulsionnels de fort niveau ou la réduction des bruits et des vibrations générés par des outils percussifs (cloueuses à bois, agrafeuses, riveteuses, perceuses, foreuses à béquille, marteaux pneumatiques, etc.). Elles semblent cependant peu utilisées jusqu'à maintenant en ingénierie vibroacoustique pour la résolution des équations de propagation d'ondes et de l'élastodynamique dans le temps, probablement à cause de difficultés analytiques pour décrire les équations gouvernantes, qui sont généralement complexes et qui requièrent des outils mathématiques et des algorithmes de résolution avancés. Ces méthodes sont toutefois beaucoup utilisées dans d'autres secteurs scientifiques comme ceux de la géotechnique, de l'aéroacoustique et de la mécanique des fluides (simulation de bruit de jet, de bords de pâles, d'hélices...).

La présente étude bibliographique vise à:

- établir un état des connaissances des diverses méthodes temporelles et documenter leur applications existantes en santé et en sécurité du travail;
- identifier lesquelles de ces méthodes permettraient de résoudre efficacement des problématiques en matière de bruit et de vibrations impulsionnelles, surtout celles liées aux protecteurs auditifs et aux outils percussifs;
- évaluer l'applicabilité de ces méthodes pour une meilleure caractérisation des matériaux poreux et amortissants.

2. OBJECTIFS

Cette activité de recherche a pour objectif général de dresser l'état de l'art des méthodes de simulation temporelles en vue de cibler leur potentiel pour la résolution des problèmes suivants:

- Prédiction des performances des protecteurs auditifs soumis à des bruits impulsionnels de fort niveau. Ceci concerne la modélisation de la propagation non linéaire à travers les matériaux de la coquille. La modélisation fine de l'atténuation des protecteurs auditifs soumis à de tels bruits est nécessaire pour une meilleure conception de ces protecteurs et pour aider à mieux comprendre leur comportement vibroacoustique.
- Prédiction des vibrations et du rayonnement de structures soumises à des excitations acoustiques impulsionnelles. Une modélisation adéquate du champ vibratoire et du rayonnement acoustique des outils percussifs causant des excitations impulsionnelles de fort niveau permettrait de mieux comprendre leur comportement vibroacoustique et d'améliorer leur conception.
- Caractérisation des matériaux poreux et amortissants (viscoélastiques). Les méthodes temporelles permettraient d'assurer une bonne prise en compte des niveaux acoustiques de forte intensité ainsi qu'une modélisation adéquate de la propagation non linéaire dans les matériaux intervenant, par exemple, dans les moyens de protection acoustique ou dans la conception des protecteurs auditifs.

Les objectifs spécifiques de l'étude sont les suivants :

- Dresser les principales formulations des méthodes temporelles et bien cerner leurs hypothèses, comprendre les procédures de résolution, déterminer les limites d'utilisation et les difficultés de mise en œuvre.
- À partir de travaux déjà réalisés en utilisant les méthodes temporelles dans la résolution de problématiques de bruit et vibrations en SST, évaluer le potentiel d'application de ces méthodes pour i) la prédiction du comportement vibroacoustique de protecteurs auditifs soumis à des bruits impulsionnels de fort niveau, ii) la prédiction et la réduction du bruit et des vibrations générés par des outils percussifs, iii) la modélisation du rayonnement acoustique de structures soumises à des impacts et à des bruits impulsionnels non linéaires et iv) une meilleure caractérisation des matériaux poreux et viscoélastiques.
- Recommander les méthodes temporelles à utiliser dans la résolution de problématiques liées aux protecteurs auditifs sous excitation impulsionnelle, aux outils percussifs, et à la caractérisation des matériaux.

Il est important de retenir que l'objectif de cette activité n'est pas de faire un recensement exhaustif de tous les travaux sur le bruit impulsionnel en milieu de travail. Il s'agit plutôt d'identifier les travaux de modélisation basés sur des méthodes temporelles et d'évaluer le potentiel de ces méthodes pour la résolution de problèmes vibroacoustiques sous excitation impulsionnelle à partir de quelques problématiques importantes liées aux protecteurs auditifs, aux outils percussifs et aux matériaux poreux.

3. MÉTHODOLOGIE

La première phase de ce projet consistait à identifier la documentation scientifique et technique ayant trait aux méthodes mathématiques temporelles. La revue de la littérature a été effectuée à partir de plusieurs ressources bibliographiques:

- Littérature scientifique dans des périodiques et autres journaux spécialisés : *Journal of the Acoustical Society of America*, *Journal of Sound and Vibration*, *Journal of Vibration and Acoustic*, *Shock and Vibration*, *Computers and mechanics*, *Journal of Applied Physics*, *Shock Waves*, *Journal of Engineering Mechanics*, *IEEE Transactions on Acoustics*, etc.;
- Ouvrages savants et thèses de doctorat ou mémoires de maîtrise portant sur les méthodes temporelles;
- Rapports techniques publiés par des instituts de recherche.

La grande partie de ces ressources a été repérée à partir de bases de données accessibles par internet: [Scopus](#), [Scirus](#) et [Google Scholar](#). L'accessibilité a été rendue possible dans plusieurs cas grâce à des ententes conclues par l'Université de Sherbrooke avec les éditeurs des documents. Dans d'autres cas, des copies des documents ont été achetées et/ou obtenues grâce à des prêts interbibliothèques.

Sauf indications explicites (quelques cas particuliers), la revue a été limitée dans le temps entre 1970 et 2012, pour se focaliser sur des recherches récentes. Les critères de recension comprenaient de multiples combinaisons de divers mots-clés dont les plus importants étaient : « méthode temporelle », « méthode fréquentielle », « modélisation », « élément fini », « élément fini de frontière », « différences finies », « bruit impulsionnel », « transitoire », « impulsif », « impact », « choc », « protecteur auditif », « coquille », « oreille », « outils percussifs », « acoustique », « élastodynamique », « caractérisation », « viscoélasticité », « matériau poreux », etc., et leur équivalent en anglais.

Les divers documents répertoriés ont été organisés en une base de données en fonction des diverses composantes de la recherche (et avec l'aide du logiciel de références [Zotero](#)).

Dans la seconde phase, les points suivants ont été étudiés pour avoir une bonne compréhension des méthodes de simulation temporelles : formulations et hypothèses; méthodes de résolution; difficultés de mise en œuvre et autres limitations; différences et complémentarités avec les méthodes fréquentielles; avantages et inconvénients... Un inventaire non exhaustif des logiciels de calcul basés sur les méthodes temporelles a aussi été dressé.

La troisième phase consistait en une analyse de la littérature recensée pour relever les travaux scientifiques qui avaient un potentiel d'applicabilité à la résolution de problématiques de SST, particulièrement dans le contexte de la réduction du bruit et des vibrations de nature impulsionnelle. Dans l'ordre de priorités et d'intérêts, l'analyse a ciblé l'application des méthodes de simulation temporelles pour :

- la prédiction du comportement vibroacoustique des protecteurs auditifs soumis à des bruits impulsionnels de fort niveau, dans l'optique d'une meilleure conception de ces protecteurs pour le bénéfice des travailleurs;
- la modélisation et la réduction des vibrations générées par les outils percussifs et du rayonnement de structures soumises à des excitations acoustiques impulsionnelles de forte intensité, pour favoriser l'avancement des connaissances sur les problèmes vibroacoustiques découlant de l'utilisation des outils percussifs et portatifs par des travailleurs;
- la caractérisation des matériaux poreux et des matériaux viscoélastiques avec des méthodes temporelles, pour favoriser une meilleure description de ces matériaux en vue de leur utilisation optimale en contexte de propagation non linéaire (absorption, amortissement et/ou isolation sous fort niveau).

L'accent a surtout été mis sur les deux premières priorités indiquées ci-dessus car elles rejoignent les orientations privilégiées de la programmation de recherche quinquennale 2013-2017 du champ Prévention des risques mécaniques et physiques de l'IRSST. Dans les cas où l'évaluation a fourni peu d'applications pertinentes, des applications secondaires ou indirectes ont aussi été relevées.

Pour évaluer le potentiel d'applicabilité des méthodes temporelles à la résolution des problématiques de bruit et vibrations en SST, il a été convenu de recenser essentiellement les études qui ont utilisé les méthodes temporelles pour résoudre l'équation de propagation d'ondes ou l'équation de l'élastodynamique et qui, en plus, ont appliqué cette résolution à des problèmes vibroacoustiques avec excitations transitoires ou impulsionnelles ou des considérations non linéaires.

4. RÉSULTATS

4.1 Fondements des méthodes temporelles

Les fondements des méthodes temporelles sont exposés dans cette section par une description générale et par une présentation des méthodes de résolution temporelles recensées lors de la revue de la littérature. Les difficultés de mise en œuvre, les avantages et inconvénients par rapport aux méthodes fréquentielles sont ensuite indiqués, et un inventaire de logiciels de calcul basés sur des méthodes temporelles est dressé.

4.1.1 Description générale des méthodes temporelles

Un système dynamique est décrit par des équations gouvernantes découlant des relations d'équilibre. Ces équations gouvernantes résultent généralement en des équations aux dérivées partielles dans lesquelles certains termes peuvent varier en fonction du temps. Les méthodes dites temporelles sont des méthodes qui permettent d'analyser directement dans le temps un phénomène dynamique, à partir de ses équations gouvernantes, de ses conditions aux frontières et de ses conditions initiales. La résolution du problème se fait en fonction de la variable temporelle, pas à pas, suivant un schéma temporel donné, c'est-à-dire que l'état du système à un instant donné est évalué à partir de l'état du système déjà évalué aux instants précédents. Pour chaque pas de temps, la solution est calculée simultanément pour l'ensemble des points du domaine considéré.

Pour les problématiques de bruit et de vibrations, les méthodes temporelles sont utilisées pour résoudre l'équation de propagation d'ondes acoustiques et l'équation élastodynamique, dans le temps. Si ces méthodes s'affranchissent positivement des hypothèses simplificatrices propres aux méthodes fréquentielles, deux critères sont toutefois incontournables pour assurer leur utilisation bénéfique et avantageuse : disposer d'un modèle mathématique exact pour décrire le problème et disposer de la capacité de résolution du modèle, analytiquement, ou plutôt numériquement dans la plupart des cas.

4.1.2 Les méthodes de résolution temporelles

La littérature scientifique fait état de plusieurs méthodes de résolution temporelles, qui sont rapportées dans cette section. Il est important de noter, *a priori*, que chacune d'elles a été utilisée par des chercheurs pour résoudre l'équation de propagation des ondes acoustiques et/ou l'équation élastodynamique qui décrit une problématique de bruit et de vibrations.

4.1.2.1 Les méthodes *Finite Difference Time Domain* (FDTD)

Les méthodes *Finite Difference Time Domain* (FDTD) constituent une approche très populaire qui a d'abord été développée par Yee [19], en 1966, pour l'analyse de problèmes en électromagnétisme, et qui, par la suite, a été appliquée dans plusieurs autres disciplines scientifiques comme la biologie, l'optique, l'acoustique et les vibrations [20]–[23]. L'approche est

basée sur une approximation par différences finies¹ des dérivées spatiales et temporelles des variables recherchées : pression et vitesse particulières dans le cas de l'équation de propagation des ondes [22,23], déplacement (ou vitesse) et contrainte dans le cas de l'équation élastodynamique [20]. Les variables sont directement calculées en des temps discrets, ce qui permet de bien modéliser des phénomènes transitoires, des bruits aléatoires, des impulsions et de bien prendre en compte des effets non linéaires [24].

La formulation de base suppose une discrétisation spatiale sous forme d'un maillage cartésien avec un pas d'échantillonnage constant de la région modélisée [26]. Les méthodes FDTD reposent donc sur une discrétisation spatio-temporelle. Le principe et l'implémentation sont relativement simples et adaptables à divers types de problèmes. Tous les calculs sont faits directement dans le domaine temporel et les équations sont discrétisées localement avec des formulations explicites. Le choix du pas d'échantillonnage influe toutefois sur la précision des résultats. Pour garantir la convergence des résultats, la discrétisation spatio-temporelle adoptée doit vérifier une condition de stabilité appelée « critère de Courant-Friedrich-Levy » [25,26], qui établit une relation entre un maillage fin et un pas temporel réduit.

La condition de stabilité constitue une des limitations des méthodes FDTD, car elle contraint d'avoir un échantillonnage fin pour éviter des effets de dispersion numérique. Par conséquent, elle peut exiger beaucoup de ressources informatiques. Aussi, les approximations de différences finies introduisent des inexactitudes dans la description des champs, surtout dans les régions de discontinuité et sur les frontières [24]. Le maillage cartésien ne favorise pas non plus la modélisation de géométries et de conditions limites complexes [29].

Plusieurs recherches ont été menées depuis les travaux de Yee pour optimiser la formulation de base des méthodes FDTD, afin de s'affranchir des limitations et de la rendre plus performante. Une option simple est d'utiliser des maillages très raffinés, mais cela se traduit par des modèles immenses qui nécessitent beaucoup de ressources informatiques. En plus, les maillages raffinés sont inutiles dans des régions où les champs varient peu. Diverses solutions alternatives ont été proposées pour optimiser les schémas de discrétisation; certaines d'entre elles sont indiquées ci-après:

- (i) maillages orthogonaux dans un système de coordonnées autres que cartésien, lorsque la structure analysée est mieux décrite par un tel système [30];
- (ii) maillages localement raffinés avec l'objectif de limiter l'augmentation du temps de calcul et des exigences informatiques [31];
- (iii) maillages « conformes » non cartésiens pour des structures de formes quelconques [32];
- (iv) maillages non uniformes dit quasi cartésiens (pour une meilleure description de frontières courbes et inclinées) [24] et maillages irréguliers [33].

¹ La résolution d'une équation aux dérivées partielles spatiales par la méthode des différences finies consiste d'abord à discrétiser géométriquement le domaine du problème, puis à réécrire l'équation en chaque point du domaine discrétisé, en remplaçant toutes les dérivées spatiales par des expressions algébriques. Chaque expression algébrique en un point est obtenue à partir d'une relation entre les valeurs des fonctions inconnues en ce point et en des points voisins.

Il existe aussi une variante FDTD appelée *Pseudo Spectral Domain Time (PSDT)* [32,33] dans laquelle les dérivées spatiales sont obtenues en appliquant d'abord une transformée de Fourier spatiale du champ à dériver; la transformation obtenue est ensuite dérivée puis une transformée de Fourier inverse est faite pour retourner dans le domaine temporel.

Par ailleurs, lorsqu'une méthode FDTD est utilisée pour traiter des problèmes de rayonnement extérieur, de milieux ouverts ou de structures infinies, il est nécessaire d'appliquer des conditions de frontière absorbante dites *Absorbing Boundary Condition (ABC)* qui permettent de restreindre le domaine de calcul. Il s'agit de conditions qui imposent une contrainte de non-réflexion des ondes incidentes au-delà d'une frontière artificielle définie dans la modélisation [21,24,28]. En général, une condition ABC peut être déduite à partir des équations différentielles du problème analysé en fixant une solution qui permet seulement des ondes incidentes, ou elle peut être imposée par l'utilisation d'un matériau absorbant fictif (non physique) qui élimine l'onde comme si elle se propageait dans un milieu absorbant. Une des plus remarquables conditions ABC est la *Perfectly Matched Layer (PML)*, « couche parfaitement accordée », qui a été développée par Berenger [36] pour l'absorption des ondes électromagnétiques. Chew et Liu [37], puis Liu et Tao [38] ont ensuite montré respectivement que cette condition de frontière s'applique aussi pour des ondes élastodynamiques et pour des ondes acoustiques [39].

4.1.2.2 Les méthodes *Time Domain Finite Element Method (TD-FEM)*

La méthode des éléments finis (FEM, pour *Finite Element Method*) a été originellement introduite dans les années 1950 dans le cadre de l'analyse de structures d'avions complexes [38,39]. Il s'agit d'une technique raffinée de discrétisation largement utilisée pour une variété de problèmes [40,26,41], en thermique, en thermodynamique, en électromagnétisme, en mécanique, en acoustique, en élasticité linéaire et non linéaire, en viscoélasticité, en milieux poreux, etc. La méthode FEM est une technique polyvalente qui, en principe, peut être exploitée dans l'analyse de structures géométriques complexes, de milieux inhomogènes et avec des matériaux de toutes sortes.

Dans cette méthode, un problème continu est remplacé par une série d'éléments dont l'assemblage constitue une approximation de la structure à analyser. Ainsi, une fonction continue sera approximée par des fonctions d'interpolation discrètes en des points du domaine, qui lui-même est remplacé par un maillage, c'est-à-dire un modèle discret de sous-régions appelé « éléments finis ». La solution recherchée est décrite dans chaque élément sous la forme d'une combinaison linéaire d'un certain nombre de fonctions d'interpolation en des points de l'élément appelés nœuds, et les coefficients de ces fonctions d'interpolation constituent les degrés de liberté du problème discrétisé, c'est-à-dire les inconnues du problème à évaluer. Ces coefficients sont en fait des variables physiques (déplacement, pression, température, etc.).

Les fonctions d'interpolation couramment utilisées sont des approximations linéaires (fonctions de Lagrange) ou des fonctions d'ordre élevé (fonctions d'Hermite). On recourt au maillage pour l'approximation du domaine qui peut contenir des éléments finis à plusieurs nœuds et de divers types, en fonction de la complexité de la géométrie et des dimensions du domaine : lignes curvilignes en 1-D, triangles ou quadrilatères curvilignes en 2-D, tétraèdres, prismes ou parallélépipèdes en 3-D [44]. Les types de maillage utilisés dans la méthode FEM conduisent

donc, *a priori*, à une discrétisation moins erronée que celle obtenue avec la méthode FDTD de base.

En résumé, la méthode FEM est dite variationnelle parce que son approche consiste à rendre stationnaire l'expression fonctionnelle associée au problème étudié. En acoustique, par exemple, la FEM utilise la forme intégrale faible de l'équation de Helmholtz pour exprimer la propagation des champs en régime harmonique. C'est pourquoi on se sert largement de cette méthode dans le domaine fréquentiel, mais son formalisme convient aussi au domaine temporel.

Dans le domaine temporel, les procédures d'éléments finis, généralement désignées sous l'acronyme **TD-FEM**, sont pour la plupart basées sur des semi-discrétisations, c'est-à-dire que les éléments finis sont utilisés dans le domaine spatial pour réduire un système d'équations différentielles ordinaires en temps; par la suite, ces équations sont discrétisées dans le domaine temporel par des algorithmes ou schémas d'intégration temporels directs basés sur des techniques conventionnelles de différences finies [42,43]. Ces schémas subdivisent l'intervalle de temps considéré en un nombre choisi de pas de temps, et la détermination de l'état du système en un instant donné repose sur l'état du système à l'instant précédent ou à des instants précédents. Ils peuvent être implicites ou explicites. Les schémas implicites demandent généralement plus de ressources informatiques que les schémas explicites parce qu'ils impliquent la résolution d'un système d'équations à chaque pas de temps, mais ils ont l'avantage d'être plus stables ou inconditionnellement stables.

Les schémas d'intégration temporels les plus populaires ont été développés par Newmark [46]. Il s'agit de schémas d'intégration à un pas, c'est-à-dire que les valeurs à un instant donné sont déterminées par les valeurs à l'instant précédent. Il existe plusieurs schémas de Newmark, qui se différencient par le choix de deux paramètres dits de Newmark. Ceux-ci permettent de déterminer le caractère implicite ou explicite ainsi que la condition de stabilité de chaque schéma [43]. Les schémas de Newmark sont reconnus pour leur simplicité; celui de la différence centrée et celui de l'accélération moyenne étant les plus usités. Outre ceux de Newmark, il existe de nombreux autres schémas, dont les plus répandus sont ceux de Wilson et coll. [47] et de Houbolt [48].

Le gros défi des schémas d'intégration temporels est le choix du pas temporel. Un grand pas peut empêcher une bonne capture de la réponse cherchée dans des régions où la valeur fluctue beaucoup. Un petit pas de temps peut exiger énormément de ressources informatiques et de temps de calcul [43].

Vu la performance établie des éléments finis dans le domaine spatial, des chercheurs ont estimé qu'il serait plus avantageux d'utiliser aussi les éléments finis, au lieu des différences finies, dans le domaine temporel [43,47,48]. Il y a ainsi des formulations éléments finis spatio-temporelles où les équations semi-discrètes (provenant de la discrétisation spatiale) sont multipliées par des fonctions poids et intégrées aux intervalles de temps. Ces formulations sous-entendent toutefois des maillages spatio-temporels structurés dans lesquels chaque élément est le produit cartésien d'un élément spatial et d'un intervalle de temps. Pour des maillages spatio-temporels plus généraux (non structurés), d'autres formulations sont basées sur des fonctions poids temporellement continues. Elles conduisent néanmoins à des systèmes de matrices couplées dans

lesquels toutes les variables doivent être résolues simultanément, à chaque intervalle de temps. Elles nécessitent donc beaucoup de ressources informatiques.

Une autre approche souvent utilisée pour la discrétisation temporelle est la *Time-Discontinuous Galerkin Method* dans laquelle les champs inconnus peuvent être discontinus aux étapes temporelles discrètes [48,49]. Dans cette approche, généralement dénommée **TDG-FEM** ou **DG-FEM**, la discrétisation repose sur des fonctions de base polynomiales continues sur chaque intervalle de temps, mais qui peuvent être discontinues dans plusieurs intervalles de temps successifs (fonctions continues par morceaux). Les schémas d'intégration temporels utilisés avec la DG-FEM sont basés sur des algorithmes Runge Kutta [52] ou sur des extensions de séries de Taylor (par exemple, l'*ADER Time Integration Method*, où les dérivées temporelles sont remplacées par des dérivées spatiales [51,52]). L'approche DG-FEM est réputée stable.

Les méthodes TD-FEM ont le grand avantage d'être appropriées à la modélisation de géométries complexes et de milieux discontinus. Leur coût de calcul CPU (*Central Processing Unit*: composante de l'ordinateur qui exécute les programmes informatiques) est toutefois élevé et, en plus, elles ne conviennent pas à des milieux semi-infinis ou infinis. Comme dans le cas des méthodes FDTD, des conditions ABC (en particulier PML) peuvent être introduites pour modéliser de tels milieux. Certaines études ont cependant indiqué que ces conditions représentent des défis mathématique et numérique considérables pour être correctement implémentées dans des problématiques d'acoustique extérieure en domaine temporel et de chocs exigeant de gros calculs informatiques [55]. Cette implémentation est toutefois maintenant effective dans certains codes de calcul comme [Virtual.Lab](#), et elle semble être performante pour résoudre les problématiques mentionnées ci-dessus. D'autres études ont proposé l'emploi d'éléments dits infinis, conçus pour prendre en compte la condition de rayonnement de Sommerfeld [54,55], comme alternative à l'utilisation de conditions ABC.

4.1.2.3 Les méthodes *Time Domain Boundary Element Method* (TD-BEM)

La méthode des éléments finis de frontière (BEM, pour *Boundary Element Method*) [58] a été élaborée à partir des années 1960, comme une méthode de résolution d'équations différentielles partielles écrites sous forme d'équations intégrales sur les frontières du domaine étudié. À partir des conditions aux limites, la méthode BEM cherche à obtenir les champs sur les frontières qui vérifient les équations intégrales, qui elles, sont considérées comme les équations gouvernantes du problème analysé. Des techniques, comme la méthode des résidus pondérés [59] ou le théorème de réciprocité [58,59], peuvent en effet être utilisées pour transformer des intégrales de domaine en intégrales de frontières. Cette méthode se limite donc à trouver les solutions sur les frontières du domaine étudié, au lieu de résoudre le problème dans tout le domaine. Si nécessaire, un post-traitement permet par la suite de calculer la solution en tout point désiré du domaine, à partir des champs et de leurs dérivées évalués sur les frontières et des équations intégrales. Comme dans le cas de la méthode FEM, la méthode BEM est applicable en ingénierie [62] et dans divers secteurs scientifiques: mécanique, électromagnétique, vibration [63], acoustique [64]... Elle est souvent désignée aussi sous les acronymes BIE, BIEM (*Boundary Integral Equation Method*) ou BIS (*Boundary Integral Solutions*).

La méthode BEM se présente comme une alternative intéressante à la méthode FEM. D'abord parce que la formulation du problème en termes de valeurs limites permet de réduire d'une unité la dimension spatiale du problème, ce qui se traduit par un maillage de surfaces ou de courbes au lieu d'un maillage du domaine complet, et donc par un gain substantiel en termes de recours aux ressources informatiques et une réduction significative en effort de modélisation et en temps de calculs. De plus, la méthode BEM convient mieux à des problèmes relatifs aux domaines semi-infinis ou infinis puisqu'elle se limite à la frontière du domaine (des éléments infinis peuvent être utilisés pour prendre en compte des frontières semi-infinies [65]). Un autre avantage de la BEM comparativement à la FEM est que la condition de Sommerfeld de rayonnement à l'infini est automatiquement prise en compte, car le noyau des équations intégrales vérifie les conditions aux limites des domaines infinis [62]. Par ailleurs, certaines limitations sont connues à la méthode BEM: elle s'accompagne de matrices généralement pleines et non symétriques, de problèmes de singularités mathématiques à traiter (surtout complexes à implémenter), et dans le domaine fréquentiel, de problèmes de non-unicité et de couplage des variables fréquence et espace (matrices dépendantes de la fréquence), d'où la difficulté de réaliser des analyses modales.

La méthode BEM a été premièrement appliquée à des problèmes d'élastodynamique transitoire par Cruse et Rizzo en 1968 [66] dans le domaine de la transformée de Laplace, puis ces chercheurs ont utilisé un algorithme numérique d'inversion pour obtenir les résultats dans le domaine temporel. Cette approche sera exposée en détail dans la Section 4.1.2.5. Mais c'est Cole et coll. [67] et surtout Mansur et Brebbia [59] qui ont introduit les méthodes **TD-BEM** en élastodynamique transitoire, en ce sens que la méthode BEM est directement appliquée dans le domaine temporel. Dohner et coll. [68] l'ont ensuite mise à profit pour l'analyse transitoire de propagation d'ondes tridimensionnelles. L'approche TD-BEM consiste globalement à utiliser des fonctions d'interpolations spatiales et temporelles pour discrétiser le problème aux valeurs limites considérées. Cela aboutit à un système d'équations algébriques qui doit être résolu à chaque étape temporelle par un schéma d'intégration implicite ou explicite, dépendamment des fonctions d'interpolations utilisées. Aucune hypothèse n'est *a priori* fixée durant les calculs sur la variation temporelle des champs, donc l'éventail des variations temporelles utilisables est large.

Les premières utilisations des méthodes TD-BEM ont révélé des insuffisances:

- Manque de généralités (problèmes souvent limités à des milieux 2-D) [63,67];
- Hypothèse grossière de variation constante des variables temporelle et spatiale, ce qui ne tient pas compte adéquatement de la nature ondulatoire des champs fréquemment rencontrés en dynamique [69];
- Traitement complexe des intégrales singulières; niveau d'exactitude inférieure à celui des FEM [70];
- Problèmes d'instabilité dans les schémas temporels [69,70].

Par conséquent, plusieurs travaux ont ensuite été menés pour optimiser les méthodes TD-BEM, essentiellement quant au choix du type de fonctions d'interpolation, de la nature de l'intégration spatiale et de l'intégration temporelle, ainsi qu'au choix du schéma d'intégration temporel à utiliser. Au lieu des premiers travaux qui utilisaient des fonctions de forme spatiales et temporelles constantes ou linéaires [57,71], plusieurs chercheurs ont proposé des fonctions de

formes spatiales isoparamétriques quadratiques et des fonctions de formes temporelles constantes ou linéaires [68,67,72]. D'autres travaux ont introduit des fonctions de formes temporelles quadratiques [43,73]. Coda et Venturini [76] ont, quant à eux, proposé une solution fondamentale avec un comportement temporel plus régulier pour favoriser plus « de généralité, d'exactitude et de stabilité ». Carrer et Mansur [77] ont utilisé le concept des parties finies d'intégrales de Hadamard [78] pour calculer les dérivées spatiales. Rizos et Karabalis [79] ont proposé une nouvelle génération de solutions fondamentales dites *B-spline Impulse Response Function* (BIRF) basées sur des fonctions polynomiales B-spline qui « conviennent à tout ordre de représentation paramétrique des variables temporelles sans exigence de calcul excessif » et qui « augmentent l'exactitude et la stabilité des résultats ». Pour sa part, Frangi [80] a montré que les interpolations spatio-temporelles proposées jusque-là s'exprimaient par un simple produit de fonctions de forme qui favorisait une intégration analytique temporelle, mais qui ne vérifiait pas, en règle générale, la condition de causalité qui assure une propagation physique et qui est fondamentale dans le domaine temporel. Il a alors proposé de nouvelles fonctions de forme à base pyramidale pour respecter la causalité et améliorer l'exactitude des résultats.

Dans les études précitées, l'intégration spatiale est généralement réalisée numériquement, sauf lorsque l'élément de frontière est une ligne; dans ce cas l'intégration temporelle est obtenue analytiquement. Plusieurs schémas d'intégration temporelle ont été proposés, dans le souci d'assurer plus de stabilité aux résultats. Entre autres: le schéma " *half-step scheme* " dit de mi-étape [69,70] basé sur des pas temporels variables; le schéma epsilon (ε -*scheme*) qui est un schéma trapézoïdal optimisé [69,70]; le schéma θ -linéaire (*linear θ method*, dérivé du schéma de Wilson pour les méthodes TD-FEM) qui suppose que les champs temporels sont linéaires sur plus d'un intervalle de temps [81] et le schéma de Houbolt, déjà utilisé dans les méthodes TD-FEM, à partir d'une formulation Galerkin de la méthode BEM [82].

Toutes ces recherches de stabilité des schémas sont liées au fait que le choix du pas temporel est crucial dans le schéma temporel utilisé. Il a été en effet montré qu'un trop petit pas temporel peut causer des instabilités numériques alors qu'un trop grand pas peut conduire à des résultats numériquement amortis [83]. Des travaux récents s'emploient encore à développer des méthodes TD-BEM alternatives plus robustes. Entre autres:

- Chien et coll. [45] ont utilisé le schéma *Time-Discontinuous Galerkin* (TDG) de la méthode DG-FEM avec des fonctions de formes temporelles quadratiques, et ils concluent à une méthode « inconditionnellement stable ».
- Zhang et Savaidis [83] ont proposé une méthode dédiée à l'analyse de fissures de structures dans laquelle la discrétisation spatiale est effectuée par une méthode de collocation alors que l'approximation des convolutions temporelles est réalisée par un schéma temporel qui exploite la formule de convolution quadratique de Lubich [84]. Une particularité de la méthode est qu'elle utilise les fonctions de Green dans le domaine de Laplace au lieu des fonctions de Green dans le domaine temporel. Elle est donc avantageuse lorsque les fonctions de Green dans les deux domaines sont semblables. Les chercheurs concluent, à partir de quelques exemples, que la méthode est moins sensible au choix du pas temporel que les autres méthodes TD-BEM.
- Ha-Duong et coll [85] ont élaboré une formulation BEM en termes d'équations intégrales de potentiels retardés (RPBIE: *Retarded Potential Boundary Integral Equations*) déjà

introduite par Groenenboom et coll. [86]. À chaque pas de temps, l'influence des potentiels surfaciques issus du passé est évaluée puis un système linéaire creux est inversé pour obtenir les potentiels présents. La solution recherchée est censée être une combinaison de potentiels surfaciques retardés (en ce sens que les fonctions de base temporelles sont évaluées à des temps retardés) et la condition de frontière est exprimée en fonction de densités des potentiels. En appliquant la RPBIE avec des discrétisations spatio-temporelles de type Galerkin, la méthode TD-BEM obtenue est dite inconditionnellement stable.

- Un grand inconvénient de la formulation RPBIE est que la réponse temporelle à chaque étape dépend de l'histoire complète de la réponse du système. Il s'agit donc d'une approche non locale en temps et en espace, c'est-à-dire qu'elle nécessite de sauvegarder l'historique complet de la solution à chaque nœud. Elle est donc coûteuse (en temps) et inefficace pour des excitations prolongées. Syvand [87] a alors proposé une version accélérée de cette formulation par l'utilisation de la « méthode multipôle rapide temporelle ». Cette méthode est inspirée de la *Fast Multiple Method* (FMM) fréquentielle, qui s'utilise en complément d'un solveur itératif pour calculer rapidement des produits de matrices et de vecteurs. La FMM fréquentielle est une technique *out-of-core*, optimisée et paramétrable, basée sur une reformulation de la fonction de Green en termes d'une décomposition multipolaire; elle serait efficace pour des problèmes de grande taille (de 2000 jusqu'à 25 millions de degrés de liberté). La méthode multipôle rapide temporelle est une adaptation de la FMM fréquentielle à partir d'une transformée de Fourier de la fonction de Green fréquentielle. Cette approche est toutefois limitée à l'emploi d'un solveur itératif et à des problèmes linéaires [87].
- Rizos et Zhou [88] ont démontré que les exigences de stabilité de la formulation RPBIE ne sont pas intuitives, car le pas de temps doit être « supérieur à une certaine valeur critique ». Ils ont alors proposé une nouvelle formulation dans laquelle la géométrie et les fonctions de formes sont des polynômes B-spline d'ordres élevés. La solution du système à tout type d'excitation est alors traitée comme une simple superposition de fonctions *B-spline Impulse Response Functions* (BIRF). Leur formulation est censée corriger les inconvénients de la méthode RPBIE.
- Dans le cadre de l'analyse de fissures de milieux solides anisotropes, il y a aussi la formulation de Beyer et coll [89] qui est une combinaison d'intégrales classiques sur les frontières externes et d'intégrales hyper-singulières sur les surfaces des fissures, avec des fonctions de formes temporelles linéaires et des fonctions de formes spatiales de type racine-carrée (pour les surfaces des fissures) et linéaires (pour les autres surfaces). La méthode de collocation a été utilisée pour les discrétisations spatiales et temporelles et, exception faite des intégrales spatiales de ligne, toutes les intégrations ont été calculées analytiquement. Wünsche et coll. [88,89,90] ont mis au point une formulation semblable à celle de Beyer et coll., avec comme variante que la discrétisation spatiale est plutôt faite par des méthodes de Galerkin.

4.1.2.4 Les méthodes TD-BEM/FEM

Cette section donne un bref survol des méthodes dites **TD-BEM/FEM** qui consistent en un couplage des méthodes présentées dans les deux sections précédentes. La notion de couplage entre les méthodes FEM et BEM a d'abord été introduite dans un contexte général par Zienkiewicz et coll. [93]. Elle permet de tirer profit des avantages des deux méthodes tout en

minimisant leurs inconvénients respectifs. Il est en effet admis que les méthodes FEM conviennent bien aux milieux inhomogènes, anisotropes ou aux matériaux à comportement non linéaire, alors que les méthodes BEM traitent mieux les problèmes en milieux étendus ou infinis. Une combinaison des deux méthodes s'avère donc intéressante pour traiter divers types de problème, par exemple les interactions fluide/structure.

Plusieurs travaux ont été menés pour mettre au point des formulations BEM/FEM dans le domaine temporel pour des fins d'analyse transitoire. Ainsi:

- (i) Estorff et Prabucki [94] ont combiné une méthode BEM avec des éléments linéaires basée sur la collocation et une méthode FEM avec une formulation résidus pondérés et en utilisant un schéma d'intégration de Newmark. Ils ont utilisé leur modèle pour évaluer la réponse dynamique d'un domaine élastique rectangulaire semi-infini et d'un plan semi-infini ainsi que le comportement d'un bloc élastique reposant sur un milieu semi-infini soumis à des charges impulsionnelles.
- (ii) Mansur et coll. [95] ont couplé la méthode BEM avec schéma dit θ -linéaire à une méthode FEM avec schéma d'intégration de Newmark. Ils ont indiqué que la méthode est assez stable « pour tout pas de temps choisi de façon réaliste » et qu'elle permet de traiter des problèmes en milieu infini où la formulation BEM sera utilisée pour jouer le rôle de frontière absorbante (à la place de conditions PML ou autres ABC).
- (iii) Plus récemment, une approche *a priori* attrayante a été élaborée par Soares Jr. et coll. [96], dans laquelle les sous-domaines FEM et BEM sont traités indépendamment en profitant des optimisations disponibles de chaque méthode, avec des pas de discrétisation temporelle différents. Le sous-domaine FEM est basé sur des fonctions de Green implicites en domaine temporel [97] et est évalué avec un schéma de Newmark. Le sous-domaine BEM utilise des fonctions d'interpolation spatio-temporelles linéaires et constantes et le schéma d'intégration temporel adopté requiert un processus de convolution temporelle tronqué [98]. Un algorithme de couplage direct est ensuite requis pour combiner les deux sous-domaines.

4.1.2.5 Les méthodes transformées dans le domaine de Laplace ou le domaine de Fourier: T-FEM, T-BEM, T-BEM/FEM et T-FDM

Les méthodes de modélisation présentées dans les sections précédentes traitaient les problèmes complètement et directement dans le domaine temporel. Il existe une autre classe de méthodes dites transformées: *Transformed Finite Element Method (T-FEM)*, *Transformed Boundary Element Method (T-BEM)*, *Transformed BEM/FEM (T-BEM/FEM)* et *Transformed Finite Difference (T-FDM)*. À la base, elles reposent sur le fait que les méthodes des éléments finis ou des éléments finis de frontière sont bien établies et plus simples à utiliser dans le domaine de Laplace ou dans le domaine fréquentiel. La transformation des équations gouvernantes hyperboliques dans le domaine de Laplace ou le domaine de Fourier aboutit en effet à des équations différentielles partielles elliptiques qui peuvent être résolues à partir de solutions fondamentales et qui évitent ainsi les produits de convolution inhérents au domaine temporel [99]. Il faut toutefois relever que les transformations de Laplace et de Fourier sont des superpositions de séries de solutions harmoniques; elles ne conviennent donc pas *a priori* à l'analyse des phénomènes non linéaires [99]. Un phénomène est dit non linéaire lorsque la

réponse ne varie pas proportionnellement à l'amplitude de l'excitation. En vibroacoustique, la non-linéarité peut provenir des grandes déformations de la structure ou du fluide (loi de comportement), mais aussi des paramètres du système qui peuvent dépendre du temps (ou de la fréquence). Elle peut être due aussi à des paramètres des équations qui varient en fonction des variables cinématiques comme la vitesse ou le déplacement.

Les méthodes transformées supposent fondamentalement que la transformée de Fourier ou celle de Laplace d'un problème de propagation d'ondes transitoire original est mathématiquement identique au problème harmonique correspondant, ce qui est le cas si « des conditions physiques importantes » sont satisfaites [100]. Il est alors possible de reconstruire le phénomène transitoire à partir du régime permanent par transformation inverse.

Les trois étapes suivantes résument les processus des méthodes transformées [101]:

- (i) Application de la transformée de Laplace ou celle de Fourier en fonction du temps aux équations du problème, ce qui conduit à un problème harmonique avec des équations indépendantes du temps (état permanent).
- (ii) Résolution numérique classique des nouvelles équations dans le domaine de transformation par une méthode BEM ou FEM ou BEM/FEM ou FDM.
- (iii) Transformation inverse des solutions pour obtenir les solutions dans le domaine temporel.

La première étape est généralement simple et peut se faire analytiquement, ou numériquement si le modèle dynamique étudié est complexe. La seconde étape se fait aussi facilement avec des modèles numériques bien établis. La difficulté des méthodes transformées réside essentiellement dans la troisième étape, c'est-à-dire dans la possibilité de disposer d'un algorithme de synthèse de Fourier ou celui d'inversion de Laplace exacts pour reconstruire les solutions dans le domaine temporel [99]. Il existe une variété de méthodes d'inversion [99,100], qui peuvent être classées en trois groupes: les méthodes d'interpolation-collocation, les méthodes basées sur des extensions de fonctions orthogonales et celles basées sur des transformées numériques de Fourier. L'algorithme le plus utilisé dans les méthodes transformées est celui de Durbin [103] basé sur des transformées de fonctions cosinus et sinus avec des données complexes; il y a aussi l'algorithme de Papoulis [104] basé sur des extensions trigonométriques avec des données réelles, et celui de Wilcox et Gibson [105] qui s'appuie sur une généralisation des principes fondamentaux d'échantillonnage. Le premier donne des résultats exacts pour les solutions à durées courtes ou longues, mais il nécessite beaucoup de temps de calcul, alors que le second, plus rapide, donne des résultats raisonnables seulement pour des solutions à durées courtes [29]. Le troisième algorithme est supposé être aussi précis, mais plus économique en temps de calcul que le premier [106].

À cause des avantages déjà indiqués de la formulation BEM par rapport à celle de FEM, la plupart des méthodes transformées sont des méthodes T-BEM dans le domaine de Laplace [99], [107]–[111] et dans celui de Fourier [112]. Mais il existe aussi des méthodes T-FEM dans le domaine de Laplace [111,112,113] et dans celui de Fourier [116], des méthodes T-BEM/FEM dans le domaine de Laplace [106], et plus rarement, des méthodes T-FDM avec résolution dans le domaine de Laplace avec les différences finies centrées [117].

Les méthodes transformées possèdent les caractéristiques avantageuses suivantes [101]:

- Il s'agit de procédures *a priori* stables et exactes, parce que la fonction de Green dans le domaine de Laplace ou de Fourier est exacte [111].
- Elles conviennent bien aux problèmes viscoélastiques à cause du principe de correspondance élastique – viscoélastique [110,115], ce qui permet de remplacer simplement les constantes élastiques d'un problème élastique par des fonctions viscoélastiques pour obtenir le problème viscoélastique correspondant. Les formulations directes dans le domaine temporel, décrites dans les sections précédentes, requièrent par contre des solutions fondamentales viscoélastiques qui ne sont pas encore connues dans tous les cas [118].
- Elles sont plus avantageuses que les méthodes conventionnelles utilisées en analyse modale, car elles ne nécessitent pas de connaître les modes propres et les fréquences naturelles du système analysé.
- À la différence des méthodes directes en domaine temporel, elles permettent de déterminer la solution pour un seul degré de liberté, en un instant donné, sans devoir connaître toute l'historique des solutions précédentes.

D'un autre côté, des inconvénients ont été relevés pour ces méthodes transformées:

- Les transformations de Laplace ou de Fourier sont des superpositions de séries de solutions harmoniques (périodiques). Par conséquent, les méthodes transformées sont applicables seulement à des problèmes linéaires [99], alors que les méthodes directes dans le domaine temporel prennent en compte les comportements non linéaires à travers les incréments et les itérations des schémas temporels [119].
- Les techniques de transformation requièrent l'évaluation d'un grand nombre d'intégrales pour s'assurer d'avoir des solutions exactes et sur une large bande dans le domaine temporel [68]. Elles nécessitent donc beaucoup de temps et de ressources informatiques.
- Les méthodes transformées exigent plus d'espace mémoire, car une grande partie de leurs procédures se fait avec des nombres complexes alors que les méthodes directes utilisent des nombres réels [111,118].
- La qualité des résultats des algorithmes de transformation inverse dépend des paramètres choisis pour les utiliser [118]. L'exactitude des résultats peut donc en souffrir, comparativement aux méthodes directes en domaine temporel (en supposant que les paramètres de contrôle de pas temporel sont maîtrisés dans les méthodes directes).
- Dans le cas des méthodes T-BEM, les formulations transformées ne profitent pas des propriétés de causalité des tenseurs de Green temporels et aboutissent par conséquent à des matrices pleines pour chaque valeur de la variable transformée [67].
- L'utilisation de transformées de Fourier rapide (FFT: *Fast Fourier Transform*) peut s'accompagner d'erreurs de repliement à cause de l'hypothèse de périodicité inhérente à la FFT [121]. Des pas fréquentiels très petits doivent être choisis pour éviter ce phénomène, ce qui influe alors sur le temps de calcul.
- Dans divers cas, les méthodes transformées semblent plus exigeantes en termes numériques que les formulations directes dans le domaine temporel, et ce, pour le même degré de précision [101]. Toutefois, une étude comparative faite par Manolis [119] sur la

résolution d'un problème d'élastodynamique transitoire de corps solides soumis à des contraintes ou à des déformations planes, a montré que des méthodes transformées étaient au moins trois fois plus rapides qu'une méthode directe et qu'elles exigeaient aussi moins de ressources informatiques...

4.1.2.6 Les méthodes *Local Boundary Integral Equations* (LBIE)

Le concept de méthodes LBIE a d'abord été introduit par Zhu [120,121] pour résoudre des équations classiques (Helmholtz, Laplace, Poisson) en 2-D. Il s'agit d'une approche sans maillage que d'autres chercheurs [122,123] ont ensuite étendue à la résolution de problèmes élastodynamiques dans le domaine temporel. Ce type de méthode a pour objectif de combiner les avantages des méthodes FEM et BEM. Au lieu d'un maillage complet du domaine de la structure analysée, un nuage de nœuds est arbitrairement réparti dans le domaine et les équations intégrales de frontière sont écrites localement sur la frontière d'un sous-domaine entourant le nœud et centré au point de collocation. Un sous-domaine dans la LBIE a une simple forme, un cercle en 2-D ou une sphère en 3-D. L'approximation des quantités physiques ne nécessite alors aucune discrétisation du sous-domaine. Après avoir exprimé localement les équations intégrales de frontières, un schéma d'approximation spatiale est utilisé pour obtenir la variation spatiale des quantités recherchées. Dans la plupart des travaux, c'est le schéma *Moving Least-Square* (MLS) des moindres carrés glissants [126] qui est utilisé, mais un schéma d'interpolation élaboré avec des fonctions de base radiale [127] a été présenté récemment comme étant plus performant.

La méthode LBIE peut être faite directement dans le domaine temporel (**TD-LBIE**) [122,123]. Dans ce cas, l'intégration spatiale conduit à un système d'équations différentielles ordinaires qui est résolu par un schéma temporel de différences finies (Houbolt ou Wilson). La méthode peut être faite aussi dans un domaine de transformation (**T-LBIE**). Par exemple [124], l'approximation spatiale MLS a été appliquée aux équations intégrales de frontière locales dans le domaine de Laplace puis une intégration numérique a été effectuée. Par la suite, le schéma d'inversion de Durbin a servi à obtenir les solutions dans le domaine temporel.

De par leur caractère local et sans maillage, les méthodes LBIE sont attrayantes. D'abord, des exemples de validation ont été présentés pour montrer que cette approche se compare positivement aux méthodes BEM conventionnelles. Surtout, elle semble bien appropriée à des problèmes inhomogènes puisque différents paramètres peuvent être pris en compte dans chacun des sous-domaines. Des chercheurs ont conclu que cette approche possède les avantages de la BEM et la polyvalence et la généralité de la FEM [124]. Son grand inconvénient est qu'elle est lente, comparativement aux méthodes BEM conventionnelles, essentiellement à cause de la forme non polynomiale des schémas d'approximation spatiale. Par ailleurs, bien que des chercheurs indiquent que son extension à l'analyse de problèmes 3-D est simple et directe, des exemples manquent pour une évaluation plus globale.

Pour conclure cette section, les deux tableaux suivants présentent une synthèse des différentes méthodes de résolution temporelles qui ont été exposées. Le Tableau 1 illustre une comparaison entre les diverses méthodes directes. Un tableau équivalent n'est pas reproduit pour les méthodes transformées parce que les observations réalisées sur les méthodes directes sont pratiquement valables pour les méthodes transformées correspondantes, exception faite de celles qui

concernent les schémas temporels. Le Tableau 2 propose un résumé comparatif entre les méthodes directes et les méthodes transformées.

Tableau 1 – Synthèse des méthodes temporelles directes

	Avantages	Limitations	Optimisations / Variantes
FDTD (approximation par différences finies des dérivées spatiales et temporelles, discrétisation spatio-temporelle avec maillages cartésiens)	Principe et implémentation simples	<ul style="list-style-type: none"> - Instabilité - Erreurs dans les régions de discontinuité - Géométries simples - Exigence numérique - Traitement de milieux finis 	<ul style="list-style-type: none"> - Maillages non uniformes, non cartésiens, localement raffinés - Ajout de conditions ABC (PML) Méthode PSDT
TD-FEM (approximation des variables par des fonctions d'interpolation discrètes en des points d'un maillage représentatif du domaine)	<ul style="list-style-type: none"> - Polyvalence - Géométries complexes et milieux discontinus - Traitement de milieux non homogènes ou anisotropes 	<ul style="list-style-type: none"> - Exigence numérique - Traitement de milieux finis - Choix approprié du pas temporel (modèles avec semi-discrétisations: pour éviter des instabilités) <p>Maillages spatio-temporels structurés (modèles avec discrétisations spatio-temporelles)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Ajout de conditions ABC (PML) - Maillages spatio-temporels non structurés - Méthode DG-FEM
TD-BEM (semi-discrétisations des équations intégrales sur les frontières du domaine à partir des intégrales de domaine et des conditions aux limites)	<ul style="list-style-type: none"> - Maillage réduit (gain de temps) - Traitement de milieux étendus, infinis et semi-infinis - Vérification automatique de la condition de rayonnement à l'infini 	<ul style="list-style-type: none"> - Matrices généralement pleines - Problèmes de singularités mathématiques et de non-unicité - Degré d'exactitude inférieure à celui des FEM - Instabilité des schémas temporels 	<ul style="list-style-type: none"> - Utilisation de fonctions de forme alternatives - Méthode RPBIE
TD-LBIE (expression locale des équations intégrales de frontières et schéma d'approximation spatial)	<ul style="list-style-type: none"> - Approche sans maillage (nuage de nœuds arbitrairement répartis) - Traitement de problèmes inhomogènes 	<ul style="list-style-type: none"> - Temps de résolution considérable 	

Tableau 2 – Tableau comparatif des méthodes directes et des méthodes transformées

	Avantages	Limitations
Méthodes directes (résolution directe dans le domaine temporel)	<ul style="list-style-type: none"> - Phénomènes non linéaires - Calculs en nombres réels 	<ul style="list-style-type: none"> - Évaluations de produits de convolution - Nécessité de prendre en compte l'historique des solutions précédentes pour évaluer les solutions à un instant donné
Méthodes transformées (transformée de Fourier ou celle de Laplace, résolution classique dans le domaine de transformation et transformation inverse)	<ul style="list-style-type: none"> - Méthodes FEM ou BEM plus simples à utiliser dans le domaine de Laplace ou celui de Fourier: procédures stables et exactes - Possibilité d'évaluer la solution en des degrés de liberté particuliers sans connaître l'historique des solutions précédentes 	<ul style="list-style-type: none"> - Restriction aux phénomènes linéaires - Exigence numérique (évaluation d'un grand nombre d'intégrales) - Calculs en nombres complexes - Instabilité des algorithmes de transformation inverse

4.1.3 Différences et complémentarités des méthodes temporelles et fréquentielles

À la différence des méthodes fréquentielles, les méthodes temporelles exposées dans les sections précédentes conviennent particulièrement à la résolution de problèmes qui comprennent des phénomènes rapides, transitoires ou impulsionnels. De tels phénomènes sont en effet caractérisés par une réponse impulsionnelle de courte durée et donc par un contenu fréquentiel à très large bande (un nombre relativement important de modes contribue à la réponse du système) [43]. Leur description fréquentielle est en général inappropriée parce que souvent approximative et très coûteuse. Les méthodes temporelles présentent donc l'avantage de produire des résultats pour toute une bande de fréquences donnée en une seule simulation [28], une simple transformée de Fourier permettant de passer des solutions temporelles aux solutions fréquentielles.

En acoustique binaurale par exemple, la fonction de transfert entre le son mesuré dans un point du canal auditif et celui mesuré au même point en champ libre pour une source donnée, est un indicateur très important qui décrit comment une onde sonore est propagée d'un point source au tympan de la personne qui écoute [128]. Pour des fins de génération du son, cet indicateur désigné sous le sigle HRTF (*Head Related Transfer Function*) est usuellement simulé sur tout le spectre audible par des méthodes fréquentielles. Les simulations dans le domaine fréquentiel doivent donc être répétées plusieurs fois pour toutes les composantes fréquentielles du spectre, alors que l'équivalent de cet indicateur dans le domaine temporel est une réponse impulsionnelle (HRIR: *Head Related Impulse Response*) [129] qui peut être obtenue plus rapidement en utilisant une méthode temporelle.

Lorsque des méthodes fréquentielles sont appliquées à la résolution de l'équation d'onde ou de l'équation élastodynamique, cela aboutit à un système d'équations linéaires algébriques. Pour des problèmes à grande échelle (à plusieurs milliers de nœuds), les matrices du système linéaire sont

énormes en plus d'être constituées de nombres complexes. Il est donc parfois difficile de conserver ces données sur disque, et la plupart des coefficients doivent être recalculés pour chaque fréquence s'il s'agit d'une méthode BEM ou lorsque le système analysé comporte des matériaux poreux ou viscoélastiques. Cela entraîne un coût informatique gigantesque. Dans ces conditions, une méthode temporelle peut s'avérer plus performante: les calculs se font en nombres réels plutôt qu'en nombres complexes, et il n'y a pas à résoudre de gros systèmes d'équations linéaires. Donc, il y a généralement moins d'exigences en termes de temps et de ressources informatiques [120].

Un autre avantage significatif des méthodes temporelles est qu'elles conviennent à l'analyse de phénomènes non linéaires (lorsque les paramètres des équations gouvernantes dépendent de la variable temporelle), comme, par exemple, la réponse d'un matériau sous l'effet d'une excitation de très fort niveau ou la propagation d'une onde de choc. Les méthodes fréquentielles ne peuvent décrire correctement ces phénomènes, puisque c'est le principe de linéarité qui permet la conversion de la variable temps en la variable fréquence via la transformée de Fourier. L'application d'une méthode spectrale doit se faire alors à partir d'approximations d'outils mathématiques complexes pour décrire les lois de comportement et la réponse du système, alors qu'une méthode temporelle traite naturellement ce type de problème, et ce, sans hypothèse simplificatrice. Contrairement donc aux méthodes fréquentielles, les méthodes temporelles ne nécessitent aucune hypothèse sur le contenu fréquentiel (basses versus hautes fréquences) ni sur la position spatiale (champ proche versus champ lointain) [130].

Les sections précédentes ont montré par ailleurs que les méthodes temporelles ont aussi des limitations:

- À défaut de simplifications, les équations gouvernantes sont généralement plus complexes que dans le domaine de Fourier ou celui de Laplace, et elles nécessitent des algorithmes plus robustes.
- Le choix de la valeur du pas temporel dans les méthodes temporelles directes paraît extrêmement critique pour assurer la stabilité et la précision des résultats. La recherche bibliographique n'a pas permis de relever un critère optimal pour ce choix. Il est noté toutefois que le pas doit être assez petit pour tenir compte des variations les plus rapides du signal et que la durée totale doit être suffisamment longue pour tenir compte des plus lentes. Donc, en plus de problèmes éventuels de stabilité et de précision des schémas, le choix du pas temporel peut nécessiter un effort important en temps de calcul et en stockage. Il n'a cependant pas été possible de trouver une étude comparative des coûts de résolution par des méthodes temporelles et des méthodes fréquentielles.
- Certaines conditions aux frontières peuvent être plus facilement prises en compte dans le domaine fréquentiel que dans le domaine temporel. Ainsi, le cas d'une surface dont les propriétés de réflexion acoustique dépendent de la fréquence (par exemple, les cheveux dans le cadre d'une simulation HRTF) peut être plus directement implémenté dans le domaine fréquentiel, alors que la prise en compte dans une méthode temporelle demanderait plus d'efforts (transformée de Fourier inverse de la condition fréquentielle de réflexion suivie de manipulations mathématiques) [120].

4.1.4 Inventaire de logiciels de calculs d'analyses temporelles

Les logiciels commerciaux suivants sont *a priori* dédiés à des simulations à base de méthodes temporelles, en acoustique et/ou en vibrations.

- ABAQUS Unified FEA développé par [Dassault Systemes](#)
- ADINA élaboré [ADINA R&D](#) (analyse FEM non linéaire de solides et structures)
- Altair RADIOSS conçu par [Altair Engineering](#) (simulations non linéaires de structures, fluides, interactions fluide-structure, systèmes mécaniques)
- ANSYS par [ANSYS Inc.](#)
- ASTRYD par METRAVIB (analyses fluide-structure) [131]
- COMSOL Multiphysics par [COMSOL Group](#)
- FEMtools Dynamics par [Dynamic Design Solutions](#) (outils de simulations de réponse transitoire de structures)
- LMS Virtual.Lab Acoustics par [LMS](#) (outil d'analyse transitoire avec un solveur *Fast Multipole* BEM)
- LS-DYNA par [Livermore Software Technology Corporation \(LSTC\)](#) (solveur implicite/explicite pour problèmes transitoires fortement non linéaires)
- Nastran par NASA et [The MacNeal-Schwendler Corporation \(MSC\)](#) (analyses non linéaires avec schémas implicites ou explicites)
- SAMCEF Mecano par [LMS](#) (module d'analyse non linéaire dynamique avec schéma temporel implicite)
- Strand7 par [STRAND7](#) (analyses dynamiques transitoires)

Il n'a toutefois pas été possible de vérifier les performances et les éventuelles limitations de ces logiciels dans le cadre de la présente étude.

Il existe aussi des logiciels propriétaires développés par des chercheurs pour des simulations en méthode temporelle. Généralement, il s'agit de codes non disponibles dans le domaine public, qui ont été utilisés dans des cas particuliers pour valider l'élaboration de nouvelles méthodes. Il y a, par exemple :

- BEST3D rapporté par Ahmad et Banerjee [70] (méthode TD-BEM)
- BEWAVE de Groenenboom [86] (méthode RPBIE)
- CABRILLO de [Gerstoft](#) [132] (méthode PSDT)
- FiDDLE de Kaul [133] (approche FDTD)
- GPBEST rapporté par Israil et Banerjee [69] (méthode TD-BEM)
- PS de Matar et coll [33,132] (méthode PSDT)

4.2 Applications à quelques problématiques de santé et de sécurité du travail

Il est utile de rappeler que le bruit impulsionnel se retrouve dans de nombreuses situations en milieu de travail. Trois problématiques particulières très importantes, qui couvrent à la fois la protection auditive, la réduction du bruit et des vibrations à la source (outils percussifs) et la réduction du bruit lors de sa propagation (matériaux), sont ciblées dans cette étude. Celles-ci figurent parmi les priorités de recherche de l'IRSST et ont fait l'objet de diverses études internationales. Ces études terrain ne traitent pas de modélisation, mais elles permettent de montrer des exemples concrets de situations de bruit impulsionnel et de révéler le potentiel de la modélisation basée sur des méthodes temporelles pour aborder ces sujets. Entre autres, on peut citer:

- Les recherches menées à [l'Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis \(ISL\)](#) sur la protection contre les bruits de fort niveau SPL, la mise au point de dispositifs individuels de protection auditive contre le bruit en milieu opérationnel militaire et l'évaluation des performances de ces dispositifs [135]–[138].
- Les études et recommandations de [l'Occupational Safety and Health Administration \(OSHA\)](#) dans le cadre du *Hearing Conservation Program for Construction Workers* pour assurer la santé et la sécurité de travailleurs de la construction qui utilisent des outils percussifs [139].
- Les travaux réalisés au [National Institute for Occupational Safety and Health \(NIOSH\)](#) sur des mesures de perte par insertion de protecteurs auditifs en contexte de bruit impulsionnel [138,139], sur le bruit impulsionnel [142] et les recommandations pour diminuer les risques de détérioration du système auditif sur les champs de tir [143], ou lors de l'utilisation d'outils pneumatiques portatifs (qui génèrent des vibrations excessives de la main et du bras et donc un risque de syndrome vibratoire main-bras) [144].
- Les travaux de l'IRSST sur la caractérisation du bruit et des vibrations émis par les outils portatifs dans l'industrie de la réparation automobile [145].

La plupart de ces études sont basées sur des mesures expérimentales et elles ont, de ce fait, révélé d'importantes contraintes. Ainsi, dans le cas des protecteurs auditifs, les difficultés suivantes sont généralement notées:

- Nécessité de moyens expérimentaux énormes et coûteux (pour la génération d'explosions sur des terrains militaires ou des champs protégés, la réalisation de tube à onde de chocs, etc.);
- Problèmes d'interprétation des mesures et du comportement du protecteur soumis à des bruits intenses;
- Problématique de conception associée (difficulté de réaliser des essais et donc de tester des prototypes).

Les études relatives aux outils percussifs ont aussi, pour leur part, révélé des difficultés de réaliser des tests sur des sujets humains (problèmes d'éthique) et des difficultés d'identification des sources sonores. La modélisation en domaine temporel pourrait donc être un atout précieux

pour contourner les problèmes précités: meilleure compréhension des mesures, gain de temps et gain de ressources par des simulations, aide à la conception...

Dans la suite de cette section, les résultats de la recherche bibliographique concernant l'application des méthodes temporelles à la modélisation de problématiques de santé et de sécurité du travail sont rapportés. Les études prioritairement retenues sont celles qui ont utilisé les méthodes temporelles pour résoudre l'équation de propagation d'ondes ou l'équation de l'élastodynamique et qui, en plus, ont appliqué cette résolution à des problèmes vibroacoustiques avec des excitations transitoires ou impulsionnelles ou avec des considérations non linéaires. En plus, quelques applications secondaires ou indirectes qui pourraient être avantageusement exploitées pour favoriser l'atténuation du rayonnement vibroacoustique provenant d'excitation impulsionnelle ou qui illustrent des points intéressants des méthodes temporelles ont aussi été rapportées.

4.2.1 Problématiques de protecteurs auditifs

Cette sous-section traite de l'application des méthodes temporelles aux problématiques de protecteurs auditifs. Il a toutefois été jugé utile de s'intéresser aussi au système auditif humain, car la prédiction exacte de l'atténuation d'un protecteur peut nécessiter aussi la prédiction de la réponse du système auditif externe sans protecteur (ce qui permettrait, par exemple, d'évaluer la perte par insertion du protecteur).

Le recensement qui suit révèle que très peu de travaux de modélisation avec des méthodes temporelles ont été effectués sur les protecteurs auditifs ou le système auditif humain. Beaucoup de modélisations sont plutôt faites dans le domaine fréquentiel (protection auditive [144,145], oreille externe sans protecteur [148]–[151], conduction osseuse [152]...). Ces modèles ne permettent pas d'analyser convenablement le comportement vibroacoustique de protecteurs auditifs soumis à des bruits impulsionnels de fort niveau. Par ailleurs, bien que le cadre de la présente étude soit focalisé sur l'excitation par bruit impulsionnel, il a été jugé intéressant de rapporter quelques études liées à la protection auditive pour des bruits stationnaires faisant appel aux méthodes de résolution temporelles. Ceci permet de montrer que ces méthodes ne sont pas limitées à la résolution de problèmes impulsionnels, mais qu'elles peuvent aussi fournir des alternatives aux méthodes fréquentielles traditionnelles.

Prédiction de la réponse de protecteurs soumis à des bruits impulsionnels à l'aide de méthodes temporelles

Réponses stationnaire et transitoire de protecteurs auditifs

Lee et coll. [106] ont élaboré une formulation T-BEM/FEM de problème couplé plaque – cavité acoustique (FEM pour la structure et BEM pour l'acoustique) pour simuler le système protecteur auditif – canal auditif. Le modèle est limité à des résultats préliminaires: une bonne comparaison est observée avec un modèle analytique dans lequel le couple protecteur – conduit est modélisé comme un système à un degré de liberté, dans le contexte d'une charge impulsive simulant un coup de feu.

Atténuation du son impulsionnel d'un protecteur auditif

Un modèle simplifié TD-FEM (avec un schéma d'intégration de Newmark) en 2-D a été mis au point par Vergara et coll. [153] à partir du module de domaine temporel de propagation d'ondes linéaires du code commercial ANSYS, pour simuler la pression sonore en contexte d'acoustique transitoire. Il a été comparé avec un système expérimental composé d'un tube d'ondes de choc (pour imposer un bruit impulsionnel), d'un protecteur et d'un dispositif de simulation du canal auditif. Des tendances passables ont été observées pour cette première version du modèle.

Gerges et coll. [154] ont aussi développé un modèle semblable (TD-FEM 2D avec schéma de Newmark) à partir du code commercial Sysnoise, qui a été comparé avec des résultats expérimentaux et qui a servi à évaluer l'influence de certains paramètres (densité, position et dimension) sur la performance des protecteurs.

Prédiction de la réponse de protecteurs ou du système auditif soumis à des bruits stationnaires à l'aide de méthodes temporelles

Performances *in situ* de protecteurs auditifs

Bockstael et coll. [155]–[158] ont conçu un modèle FDTD pour évaluer la fonction de transfert utilisée dans la méthode *Microphone In Real Ear* (MIRE – Microphone placé dans une oreille réelle) entre le microphone placé dans le canal auditif (derrière le protecteur auditif) et la pression acoustique au tympan. Le modèle est représentatif de la réalité, mais il repose sur des paramètres géométriques personnalisés du protecteur et de l'oreille étudiée. Les chercheurs indiquent toutefois que ces exigences se traduisent par des coûts de calcul énormes qui peuvent limiter l'utilisation pratique du modèle [158]. Des simplifications ont donc été apportées à la méthode, et elles ont permis d'élaborer des filtres digitaux pour contrôler la performance *in situ* des protecteurs auditifs, avec deux approches pour les coefficients des filtres: *Multiple linear regression* et *Multivariate Orthonormal Vector Fitting* [158].

Calcul de l'indicateur HRTF

Le *Head-Related Transfer Function* (HRTF) est un indicateur très important en acoustique binaurale pour obtenir une bonne description de la propagation d'une onde sonore d'un point source au tympan d'un récepteur (la personne qui écoute). Il s'agit d'une fonction de transfert entre le son mesuré dans un point du canal auditif et celui mesuré au même point en champ libre, pour une source donnée. Plusieurs travaux de recherche y sont consacrés et la plupart sont basés sur des techniques fréquentielles [159]–[167]. Il existe tout de même quelques méthodes temporelles de calcul de cet indicateur, dont les suivantes:

- Xiao et Liu [168] ont élaboré un modèle FDTD en 3-D avec des conditions absorbantes PML pour simuler l'interaction de l'onde acoustique avec la tête humaine, et mieux comprendre et prédire les effets de la géométrie de la tête et du milieu environnant sur le calcul du HRTF. Cet indicateur étant défini dans le domaine fréquentiel, il est obtenu par une transformée de Fourier des résultats du modèle FDTD. Pour réduire les coûts de calcul, une source externe est utilisée en dehors du domaine de calcul par la formulation « *scattered field/total field* », bien connue en calculs électromagnétiques (le domaine de calcul sans la région PML est scindé par une interface virtuelle en une région interne où le champ total est résolu et en une région externe où seul le champ diffracté est résolu). Le modèle a été validé avec des solutions analytiques pour un modèle de tête sphérique

jusqu'à 7 kHz et il a été exploité pour calculer le HRTF d'un modèle de tête réaliste en divers contextes (tête en présence de mur, par exemple). Le modèle ne tient toutefois pas compte de divers effets environnementaux.

- Un modèle TD-BEM a aussi été proposé par Chan et Heng [120] à partir d'une formulation combinant l'équation intégrale de Helmholtz et sa dérivée normale, pour évaluer le HRTF. Des conditions de frontière dépendantes de la fréquence (exemple de cheveux) doivent toutefois être prises en compte par leur transformée de Fourier inverse et à partir d'une décomposition de la pression totale en pression incidente et pression réfléchie en tout point de la frontière. Le modèle est comparé positivement avec un autre modèle fréquentiel de calcul du HRTF.

Le calcul du HRTF par une technique temporelle peut offrir une alternative avantageuse, car les modèles fréquentiels de calcul de cet indicateur doivent être répétés sur toutes les fréquences du spectre audible. Le coût en temps de calcul et en ressources informatiques peut alors être immense. Par exemple, Katz [128] a présenté un modèle BEM en domaine fréquentiel qui contient 22 000 éléments et dont le temps de calcul pour une seule fréquence est de l'ordre de 28 heures de temps CPU. Le chercheur a donc dû limiter la plage fréquentielle de calcul entre 1 kHz et 5.4 kHz avec un pas fréquentiel de 100 Hz ou 400 Hz, pour pouvoir compléter le calcul d'un modèle simple d'une seule oreille en 50 jours de temps CPU. Par ailleurs, certains chercheurs ont appliqué une transformée de Fourier inverse au HRTF pour obtenir l'équivalent en domaine temporel qui est l'indicateur *Head Related Impulse Response* (HRIR) [164]. Il paraît donc idéalement plus avantageux de disposer de modèles en domaine temporel pour calculer plutôt le HRIR et pour éventuellement obtenir le HRTF par transformée de Fourier, surtout lorsque le spectre fréquentiel considéré est très vaste.

4.2.2 Problématiques liées aux outils percussifs et au bruit impulsionnel (phénomènes transitoires)

Il a déjà été indiqué, au début de la Section 4.2, que des études expérimentales ont été réalisées sur le bruit des outils percussifs. Le recensement qui suit fait état des modèles conçus dans le domaine temporel pour des applications liées aux phénomènes transitoires, plus précisément: la prédiction et la réduction du bruit et des vibrations générés par des outils percussifs, la modélisation du rayonnement acoustique de structures soumises à des impacts [167,168,169] et à des bruits impulsionnels non linéaires. Il illustre toutefois, qu'en général, ces modélisations ne traitent pas directement d'applications en santé et en sécurité du travail, mais il révèle néanmoins un potentiel favorable pour ces applications.

Réponse vibroacoustique d'un système plaque-cavité elliptique soumis à des chocs

Hasheminejad et coll. [109] ont construit un modèle vibroacoustique T-BEM en 3-D pour la réponse d'un système plaque - cavité de forme elliptique soumis à des bruits de type chocs. La transformée de Laplace est d'abord appliquée aux équations vibroacoustiques pour obtenir un système linéaire couplé d'équations algébriques, qui est ensuite tronqué puis résolu numériquement avec le schéma d'inversion de Durbin. Le modèle considère diverses excitations (force ponctuelle impulsive, charge impulsionnelle uniformément répartie et explosion uniformément répartie) et les réponses vibratoire et acoustique sont évaluées et comparées avec le logiciel commercial ABAQUS. Les chercheurs ont estimé que leur modèle favorisera des

applications en design de contrôle du bruit de véhicules ou de machines, en acoustique du bâtiment et en acoustique aéronautique, de même que dans la conception de transducteurs. Il peut aussi être appliqué aux problèmes de vibrations et de rayonnement intérieur de rivetage, martelage, chocs, donc servir à modéliser l'environnement vibroacoustique de travailleurs utilisant des outils percussifs.

Étude de sons transitoires rayonnés par des corps solides en collision

Dans un souci d'investigation des mécanismes régissant les bruits et les vibrations importants produits par des outils mécaniques de plus en plus rapides et puissants, un modèle T-BEM a été développé par Nishigaki et coll. [110] pour simuler le rayonnement acoustique transitoire provenant de la collision d'un cylindre ou d'un cube d'acier avec une sphère en acier. Les résultats du modèle ont été comparés positivement à des mesures expérimentales; il peut donc servir potentiellement à étudier les bruits d'impacts sur les lieux de travail.

Problèmes élastodynamiques transitoires

Des modèles TD-BEM, mis au point par Banerjee et coll. [65], Ahmad et Banerjee [70] puis Israil et Banerjee [69], ont servi à évaluer les réponses dynamiques transitoires de diverses configurations: cavité sphérique en milieu infini soumise à une pression radiale soudaine impulsionnelle ou à une onde plane; plaque flexible reposant sur un milieu élastique semi-infini et soumise à une charge impulsionnelle; milieu élastique semi-infini sous distribution de contrainte continue ou impulsion de forme triangulaire. En santé et en sécurité du travail, ces modèles peuvent être mis à profit pour résoudre des problématiques de chocs puisque l'application soudaine de charges impulsionnelles équivaut à des chocs. Un problème de Lamb consistant en l'application d'une force ponctuelle impulsionnelle verticale sur la surface d'un milieu semi-infini a aussi été étudié. Les modèles pourraient donc être appliqués aux problématiques liées à l'utilisation de cloueuses pneumatiques et autres outils percussifs, qui ont des similitudes avec le problème de Lamb indiqué ci-dessus.

Problématiques d'analyses viscoélastiques

Les matériaux viscoélastiques peuvent être très utiles dans la résolution de problèmes de SST, de par leur nature (matériaux à comportement viscoélastique comme les caoutchoucs) et leur conception (ils peuvent servir à amortir des bruits d'impact ou des systèmes résonants). La présente étude s'est donc intéressée à la prise en compte de ce type de matériau dans les méthodes temporelles. Elle a permis d'observer que les considérations viscoélastiques peuvent être intégrées dans les méthodes de résolution temporelles, essentiellement à partir du principe de correspondance entre élasticité et viscoélasticité. Ce principe stipule que les équations viscoélastiques d'un problème sont obtenues en établissant d'abord les équations du problème élastique correspondant, puis en remplaçant ensuite les constantes élastiques dans ces équations élastiques par des fonctions viscoélastiques. De façon générale, tous les types de méthodes présentés dans la Section 4.1.2 ont été utilisés, parfois avec des variantes, pour traiter des problèmes viscoélastiques:

- Plusieurs chercheurs ont analysé les problèmes viscoélastiques avec des méthodes temporelles directes. Ainsi, Cabrini et coll. [172] puis Lee et Kim [173] et Lee et Westmann [174] ont d'abord élaboré des modèles TD-BEM pour traiter les problèmes de viscoélasticité linéaire. La progression temporelle du premier repose sur des considérations variationnelles des solutions frontières, alors que le second utilise un

schéma d'intégration temporel basé sur la règle de Simpson modifiée. Pan et coll. [111] rapportent cependant que l'analyse directe dans le domaine temporel comporte des inconvénients: des expressions exactes des fonctions de Green dans le domaine temporel peuvent ne pas être disponibles, et les approximations utilisées constituent donc des sources potentielles d'erreurs. En plus, les formulations directes dans le domaine temporel requièrent des solutions fondamentales viscoélastiques, alors que celles-ci sont parfois connues seulement dans le domaine fréquentiel [175].

- Dans une étude comparative, Gaul et Schanz [176] ont proposé deux autres modèles alternatifs TD-BEM avec prise en compte de la viscoélasticité, modèles *a priori* intéressants. L'un d'eux fait une intégration analytique des termes de convolutions à chaque étape temporelle donnée, puis les propriétés viscoélastiques sont introduites après une transformation de Laplace et les solutions temporelles à cette étape sont obtenues par transformation inverse. L'autre modèle utilise la « méthode de convolution quadratique de Lubich » pour évaluer les termes de convolution qui sont approximés par une formule quadratique dont les poids d'intégration dépendent seulement des solutions fondamentales dans le domaine de la transformée de Laplace [175] et d'un schéma linéaire multi-étape. Cette dernière approche ne nécessite pas de transformation inverse et paraît donc attrayante. Les modèles ont servi à analyser une barre viscoélastique 3-D et un bloc de béton sur un milieu viscoélastique semi-infini soumis à des charges axiales.
- D'autres chercheurs ont plutôt traité des problèmes viscoélastiques avec des méthodes temporelles transformées. Sogabe et coll. [113] et Barret et Gotts [115] ont utilisé des modèles T-FEM (en domaine de Laplace et avec des éléments infinis) dans lesquels la viscoélasticité est prise en compte dans le coefficient de Poisson et/ou le module de Young. Ils ont traité des exemples de plaque viscoélastique sous impact (pour le premier modèle), de sphère creuse pressurisée, de mur viscoélastique inséré dans des murs rigides et excité par une charge temporelle et de disque viscoélastique circulaire en rotation (pour le second modèle). Le second modèle peut donc être potentiellement appliqué en SST à des problématiques liées au bruit de scies circulaires.
- Dey et Tirumala Rao [117] ont eu recours au modèle T-FDM (en domaine de Laplace) pour analyser des plaques et membranes circulaires avec modèle viscoélastique de Kelvin soumises à des charges latérales.
- Des modèles T-BEM tenant compte de la viscoélasticité ont été développés dans le domaine de Laplace par Ahmad et Manolis [99] et Pan et coll. [111]. Les premiers ont analysé des blocs solides soumis à des charges de type Heaviside avec le modèle viscoélastique de Maxwell, alors que les seconds ont étudié des milieux viscoélastiques avec trous circulaires à partir de modèles viscoélastiques de Boltzmann ou de Burger.

4.2.3 Application à la caractérisation de matériaux poreux

À la différence des méthodes classiques de caractérisation des matériaux qui opèrent dans des conditions statiques ou dynamiques, les méthodes temporelles pourraient être appliquées à la caractérisation des matériaux poreux et viscoélastiques pour favoriser une prise en compte optimale de ces matériaux dans des contextes de propagation transitoire ou non linéaire, comme l'absorption, l'amortissement ou l'isolation de bruit et/ou vibrations de niveau intense. La

caractérisation des matériaux à l'aide des méthodes temporelles serait bénéfique aussi dans diverses autres applications comme l'imagerie médicale ou pour résoudre des problèmes de diffusion inverse qui nécessitent de bien étudier la propagation d'ondes pulsantes à travers des matériaux poreux [177]. Une méthode de caractérisation simple en domaine temporel est la mesure des vitesses de phase et donc l'identification de l'équation de dispersion d'une structure. Ceci permet de caractériser la structure, et ainsi de prédire sa réponse vibratoire et acoustique.

La présente étude bibliographique a permis de constater que peu de chercheurs ont œuvré pour concevoir ce type de caractérisation. C'est surtout Fellah et ses collègues qui mènent des travaux [178]–[185] depuis plus d'une décennie pour permettre de déterminer des paramètres intrinsèques des matériaux poreux par des méthodes temporelles. Ces chercheurs sont partis du constat que beaucoup de matériaux élastiques absorbent partiellement de l'énergie, et donc qu'en référence à la théorie de « l'élasticité pure », les constantes élastiques liant les contraintes et les déformations peuvent être remplacées par des opérateurs intégraux ou de différenciation temporelle. Ainsi, la réponse temporelle d'un matériau peut être décrite par une réponse instantanée et des termes de « susceptibilité » qui décrivent les effets de mémoire du matériau. D'un autre côté, les chercheurs ont noté que la dérivation fractionnaire [186] est souvent utilisée dans le domaine scientifique pour décrire les propriétés des matériaux viscoélastiques [185,186]. Il a en effet été démontré que les dérivées d'ordre fractionnaire permettent d'établir un rapport entre les champs de contrainte et les champs de déformation dans les matériaux viscoélastiques, et que les équations constitutives qui emploient ces dérivées sont liées aux théories microscopiques permettant de décrire le comportement macroscopique de ces milieux. Les chercheurs ont alors formulé les équations de base de modèles de milieux poreux dans le domaine temporel. Dans le domaine fréquentiel, ces équations dépendent originellement de deux termes de « susceptibilité » qui sont la tortuosité dynamique et la compressibilité dynamique [189]. En considérant des approximations hautes fréquences, les expressions asymptotiques de ces termes de susceptibilité sont exploitées par transformées de Fourier pour formuler les équations d'Euler et de conservation de la masse dans le domaine temporel, et il est observé que le terme de retard dans ces nouvelles équations est proportionnel à une dérivée fractionnaire de l'ordre d'un demi. Une équation d'onde en domaine temporel peut alors être établie à partir des équations de base reformulées. En modélisant ensuite la propagation d'une onde ultrasonore dans un panneau de matériau poreux, la solution générale de l'équation de propagation permet d'établir les noyaux des opérateurs de réflexion et de transmission en fonction des caractéristiques recherchées du milieu poreux (porosité, tortuosité et longueur caractéristique visqueuse [183], module de Young et coefficient de Poisson [184]). Des mesures de transmission et/ou de réflexion d'ondes pulsantes incidentes se propageant à travers un ou deux panneaux de matériau poreux conduisent alors à la détermination de ces caractéristiques par des méthodes d'inversion basées sur les moindres carrés et consistant à minimiser des fonctions coût représentant un écart entre des mesures et les modèles. Divers exemples ont été fournis pour illustrer que cette approche de caractérisation permet, dans certaines configurations de tests, de déterminer des caractéristiques acoustiques et physiques de matériaux poreux. Des études supplémentaires doivent toutefois permettre de généraliser l'approche.

5. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

La revue de la littérature sur l'application des méthodes de simulation temporelle pour la résolution des problématiques de bruit et vibrations en lien avec la SST a d'abord permis de décrire et de cerner les fondements des diverses méthodes temporelles. Les principes et les implications des méthodes directes FDTD, TD-FEM, TD-BEM, TD-BEM/FEM, des méthodes transformées T-FEM, T-BEM, T-BEM/FEM et T-FDM et des méthodes locales LBIE ont été exposés. Les différences et les complémentarités des méthodes temporelles et fréquentielles ont été indiquées. Il a ainsi été établi que les méthodes fréquentielles conviennent bien à des phénomènes stationnaires et linéaires, alors que les méthodes temporelles sont plus adaptées à la résolution de phénomènes transitoires (à courte durée de vie) et à la prise en compte de comportements non linéaires. Un inventaire non exhaustif de logiciels propriétaires développés par des chercheurs et de logiciels commerciaux basés sur des méthodes temporelles a été dressé. Le coût d'acquisition de certains codes commerciaux peut toutefois être excessif, et les logiciels propriétaires ne sont généralement pas disponibles dans le domaine public.

La revue bibliographique a ensuite été exploitée pour recenser les travaux utilisant les méthodes temporelles dans la résolution de problématiques liées aux bruits et aux vibrations en SST. Deux critères ont été prioritairement retenus pour évaluer le potentiel d'application des méthodes à ces problématiques: d'abord, la méthode temporelle doit être utilisée pour résoudre l'équation de propagation d'ondes ou l'équation de l'élastodynamique; également, la résolution doit être appliquée à des problèmes vibroacoustiques avec des excitations transitoires ou impulsionnelles ou avec des considérations non linéaires. Par la suite toutefois, quelques applications de méthodes temporelles à des problématiques vibroacoustiques sans bruit impulsionnel ont été mentionnées pour illustrer l'existence de leur utilisation en contexte de protection auditive. Il est important de souligner également que plusieurs travaux liés à la modélisation de la protection auditive et du système auditif ont été réalisés dans le domaine fréquentiel et pour des bruits stationnaires. Ils révèlent que des efforts de modélisation en domaine temporel pourraient être potentiellement avantageux en gain de temps et de ressources informatiques, et pour prendre en compte des phénomènes transitoires ou non linéaires.

Diverses applications de modélisation temporelle en lien avec des phénomènes transitoires ont été rapportées. Elles permettent d'évaluer le potentiel d'applicabilité des méthodes temporelles à des problématiques vibroacoustiques des outils percussifs, des modélisations directes relatives à ces outils n'ayant pas été trouvées.

Des analyses dans le domaine temporel prenant en compte des considérations viscoélastiques ont aussi été présentées. Elles indiquent que les diverses méthodes de résolution temporelles peuvent gérer ces considérations à partir du principe de correspondance élastique – viscoélastique. Enfin, des travaux réalisés pour une meilleure caractérisation des matériaux poreux par des méthodes temporelles ont été rapportés.

La présente activité de recherche a aussi permis d'identifier plusieurs études expérimentales qui ont été menées sur les performances des protecteurs auditifs en contexte de bruit impulsionnel ou d'impact, et sur l'utilisation des outils portatifs par des travailleurs. Il a alors été noté que la modélisation dans le domaine temporel pourrait représenter un grand atout en santé et en sécurité

du travail, pour une compréhension et une interprétation optimale de ces études. Elle est susceptible de servir aussi d'alternative économique (temps et ressources) aux études expérimentales et d'aide à la conception de protecteurs auditifs plus performants et d'outils percussifs moins vibrants.

De façon plus dépouillée, il a été relevé que le domaine d'applicabilité des méthodes temporelles à des problématiques de bruit et vibrations paraît encore assez ouvert. Bien que plusieurs méthodes de résolution temporelles aient été proposées depuis plus de trois décennies, chacune d'entre elles semble souvent destinée à traiter des cas particuliers. Plusieurs méthodes se sont en effet limitées à traiter des cas académiques à une ou deux dimensions. Par ailleurs et plus globalement: (i) les méthodes FD et FEM sont censées être trop exigeantes en ressources; (ii) des questions de stabilité des schémas temporels continuent à être étudiées pour les méthodes directes BEM.; (iii) les méthodes transformées ne peuvent pas traiter convenablement les problèmes non linéaires.

L'activité de recherche a donc recensé peu de cas concrets d'utilisation de méthodes temporelles pour la résolution de problématiques de bruit et vibrations avec des excitations de type impulsionnel. Il serait, par conséquent, approprié de poursuivre ce travail par un test de certains des logiciels commerciaux de résolution temporelle existants sur quelques applications concrètes de bruit et vibrations de nature impulsionnelle en santé et en sécurité du travail. Cette nouvelle étude permettrait d'évaluer pratiquement l'efficacité réelle de ces codes pour traiter des problèmes de SST. Dans l'éventualité où les tests des logiciels commerciaux ne seraient pas positivement concluants, il serait alors opportun de développer des outils de modélisation temporelle plus complets et performants, qui seraient dédiés à l'analyse de problématiques spécifiques de bruit et de vibrations en matière de SST.

L'activité de recherche a aussi permis d'explorer les potentialités de l'application des méthodes temporelles pour une meilleure caractérisation des matériaux poreux. Mais vu l'avancement de la recherche qui ne semble pas encore généralisé sur la caractérisation de tous les paramètres des matériaux poreux, les auteurs recommandent la mise en œuvre d'une veille scientifique sur ce volet de caractérisation.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Réseau public québécois en santé et sécurité au travail, « Bruit, surdité et autres conséquences », sept-2007. Repéré à <http://www.santeautravail.qc.ca/Afficher.aspx?section=546&langue=fr> [Dernière consultation : 03-oct-2012].
- [2] Organisation Internationale du Travail, « Votre santé et votre sécurité au travail; le bruit au travail ». Repéré à http://training.itcilo.it/actrav_cdrom2/fr/osh/noise/noiseat.htm [Dernière consultation : 03-oct-2012].
- [3] R. Héту, « Human response to sound and its implication to Safety », présenté à Proceedings of the Third International Congress on Air and Structure-Borne and Vibration, 1994, p. 455-469.
- [4] Institut national de santé publique du Québec, « Le bruit en milieu de travail: une analyse des coûts pour le régime d'indemnisation », oct-2007. Repéré à <http://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/712-BruitMilieuTravail.pdf> [Dernière consultation : 03-oct-2012].
- [5] Organisation Mondiale de la Santé, « Surdité et déficience auditive. Aide-mémoire N°300 », avr-2010. Repéré à <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs300/fr/index.html> [Dernière consultation : 03-oct-2012].
- [6] Institut national de recherche et de sécurité, « La main en danger. Syndrome des vibrations », 2007. Repéré à <http://www.inrs.fr/accueil/produits/mediatheque/doc/publications.html?refINRS=ED%20863> [Dernière consultation : 03-oct-2012].
- [7] P. Guinchard, B. Charbotel, E. Pouget, et A. Bergeret, « Exposition professionnelle à la conduite de véhicules légers et risques pour la santé (hors accidents de la route): Revue de la littérature », *Arch. Mal. Prof. Environ. Elsevier*, vol. 69, n° 3, p. 464 - 474, 2008.
- [8] I. Dupery, C. Fabin, E. Le Corre, E. Montchamp, P.-Y. Monteleon, P. Nicolazzo, R. Petitfour, C. Vilaine, et C. Wargon, « Vibrations, chariots automoteurs et engins de chantier: enquêtes épidémiologique, ergonomique et métrologique », Institut national de recherche et de sécurité, Études et enquêtes TF 192, 2011.
- [9] N. Atalla, « A.D.N.R. An efficient code for the study of the effects of structural design modifications on the radiated power », *J Acoust Soc Am*, vol. 95, n° 5, p. 2834 - 2835, 1994.
- [10] M. Tournour et N. Atalla, « Vibroacoustic behavior of an elastic box using state-of-the art FEM-BEM approach », *Noise Control Eng. J.*, vol. 46, n° 3, p. 83 - 90, 1998.
- [11] P. Marcotte, S. Ouellette, G. Leblanc, P.-É. Boileau, J. Boutin, B. Quesnel, et R. Oddo, « Development of an antivibratile handle for pneumatic jackleg rock drills », présenté à Proceedings 11th International Conference on Hand-Arm Vibration, 2007.

- [12] F. Sgard, N. Atalla, C. K. Amédin, et R. Panneton, « Étude numérique et expérimentale de l'absorption acoustique et de la transparence acoustique des matériaux poreux hétérogènes en basses fréquences dans le but d'identifier des solutions à fort potentiel d'applicabilité », IRSST, Montréal, Études et recherches Rapport R-278, 2001.
- [13] O. Beslin, « Identification, modélisation et réduction du bruit des systèmes surpresseurs fixes et mobiles », IRSST, Montréal, Études et recherches Rapport R-290, 2002.
- [14] N. Atalla, C. K. Amédin, Y. Atalla, R. Panneton, et F. Sgard, « Développement de nouveaux matériaux absorbants à hautes performances acoustiques pour diminuer le bruit en basses fréquences », IRSST, Montréal, Études et recherches Rapport R-370, 2004.
- [15] R. Le et P. Laliberté, « Conception d'un protecteur auditif à suppression de bruits dominants », IRSST, Montréal, Études et recherches Rapport R-361, 2004.
- [16] F. Sgard, N. Atalla, et C. K. Amédin, « Vibro-acoustic behavior of a cavity backed by a plate coated with a meso-heterogeneous porous material », *Acta Acust. United Acust.*, vol. 93, n° 1, p. 106 - 114, 2007.
- [17] J. Lavoie, F. Sgard, J. Boutin, et M. Hains, « La lutte contre le bruit en milieu de travail au Québec - une solution innovatrice: "la scie silencieuse" », *Trav. Santé*, vol. 25, n° 2, 2009.
- [18] F. Sgard, H. Néglise, N. Atalla, C. K. Amédin, et R. Oddo, « Prediction of the acoustical performance of enclosures using a hybrid statistical energy analysis: image source model », *J Acoust Soc Am*, vol. 127, n° 2, p. 784 - 795, 2010.
- [19] K. S. Yee, « Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media », *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 14, n° 3, p. 302 - 307, mai 1966.
- [20] J. Virieux, « P-SV wave propagation in heterogeneous media: Velocity-stress finite-difference method », *Geophysics*, vol. 51, n° 889, 1986.
- [21] F. Schubert, A. Peiffer, B. Köhler, et T. Sanderson, « The elastodynamic finite integration technique for waves in cylindrical geometries », *J Acoust Soc Am*, vol. 104, n° 5, p. 2604 - 2014, 1998.
- [22] S. Sakamoto, S. Takuma, et H. Tachibana, « Visualization of sound reflection and diffraction using finite difference time domain method », *Acoust. Sci. Technol.*, vol. 23, n° 1, p. 34 - 39, 2002.
- [23] C. Bommaraju et R. Marklein, « Optimally accurate second-order time-domain finite-difference scheme for acoustic, electromagnetic, and elastodynamic wave modeling: one-dimensional case », *IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp.*, vol. 2, p. 1499 - 1502, 2004.
- [24] D. Botteldooren, « Acoustical finite-difference time-domain simulation in a quasi-Cartesian grid », *J Acoust Soc Am*, vol. 95, n° 5, p. 2313 - 2319, 1994.
- [25] D. Botteldooren, « Finite-difference time-domain simulation of low-frequency room acoustic problems », *J Acoust Soc Am*, vol. 98, n° 6, p. 3302 - 3308, 1995.
- [26] S. Wang, « Finite-difference time-domain approach to underwater acoustic scattering problems », *J Acoust Soc Am*, vol. 99, n° 4, p. 1924 - 1931, 1996.

- [27] A. Taflove et M. E. Brodwin, « Numerical Solution of Steady-State Electromagnetic Scattering Problems Using the Time-Dependent Maxwell's Equations », *IEEE Trans Microw. Theory Tech.*, vol. 23, n° 8, p. 623 - 630, 1975.
- [28] C. Pereira, « Étude avancée des canaux de transmission radio en contexte MIMO: environnements complexes et couplage inter-antennes très large bande », Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 2006.
- [29] G. D. Manolis et D. E. Beskos, « Dynamic stress concentration studies by boundary integrals and Laplace transform », *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 17, n° 4, p. 573 - 599, 1981.
- [30] K. L. Shlager et J. B. Schne, « A selective survey of the finite-difference time-domain literature », *IEEE Antennas Propagation Mag.*, vol. 37, n° 4, p. 39 - 57, 1995.
- [31] I. S. Kim et W. J. R. Hofer, « A local mesh refinement algorithm for the time domain-finite difference method using Maxwell's curl equations », *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 38, n° 6, p. 812 - 815, 1990.
- [32] K. K. Mei, A. Cangellaris, et D. J. Angelakos, « Conformal time domain finite difference method », *Radio Sci.*, vol. 19, n° 5, p. 1145 - 1147, 1984.
- [33] V. Girault, « Theory of a Finite Difference Method on Irregular Networks », *SIAM J. Numer. Anal.*, vol. 11, n° 2, p. 260 - 282, 1974.
- [34] Q. H. Liu, « The PSTD algorithm: A time-domain method requiring only two cells per wavelength », *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 15, n° 3, p. 158 - 165, 1997.
- [35] O. B. Matar, V. Preobrazhensky, et P. Pernod, « Two-dimensional axisymmetric numerical simulation of supercritical phase conjugation of ultrasound in active solid media », *J Acoust Soc Am*, vol. 118, n° 5, p. 2880 - 2890, 2005.
- [36] J.-P. Berenger, « A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves », *J. Comput. Phys.*, vol. 114, n° 2, p. 185 - 200, 1994.
- [37] W. C. Chew et Q. H. Liu, « Perfectly matched layers for elastodynamics: a new absorbing boundary condition », *J. Comput. Acoust.*, vol. 4, n° 4, 1996.
- [38] Q.-H. Liu et J. Tao, « The perfectly matched layer for acoustic waves in absorptive media », *J Acoust Soc Am*, vol. 102, n° 4, p. 2072 - 2082, 1997.
- [39] T. Huttunen, J. P. Kaipio, et P. Monk, « The perfectly matched layer for the ultra weak variational formulation of the 3D Helmholtz equation », *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 61, n° 7, p. 1072 - 1092, 2004.
- [40] M. J. Turner, R. W. Clough, H. C. Martin, et L. P. Topp, « Stiffness and deflection analysis of complex structures », *J Aeronaut Sci*, vol. 23, n° 9, p. 805 - 823, 1956.
- [41] O. C. Zienkiewicz, « Origins, Milestones and Directions of the Finite Element Method – A Personal View », *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 2, n° 1, p. 1 - 48, 1995.
- [42] J. K. Oden, « A general theory of finite elements. II. Applications », *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 1, n° 3, p. 247 - 259, 1969.

- [43] N. Mahjoubi, « Méthode générale de couplage de schéma d'intégration multi-échelles en temps en dynamique des structures », Thèse de doctorat, INSA de Lyon, Lyon, 2010.
- [44] J. K. Oden, « A general theory of finite elements. I. Topological considerations », *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 1, n° 2, p. 205 - 221, 1969.
- [45] C.-C. Chien, Y.-H. Chen, et C.-C. Chuang, « Dual reciprocity BEM analysis of 2D transient elastodynamic problems by time-discontinuous Galerkin FEM », *Eng. Anal. Bound. Elem.*, vol. 27, n° 6, p. 611 624, 2003.
- [46] M. N. Newmark, « A method of computation for structural dynamics », *J Eng. Mech. Div.*, vol. 85, p. 67 - 94, 1959.
- [47] E. L. Wilson, I. Farhoomand, et K. J. Bathe, « Nonlinear dynamic analysis of complex structures », *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 1, n° 3, p. 241 - 252, 1972.
- [48] J. C. Houbolt, « A recurrence matrix solution for the dynamic response of elastic aircraft », *J. Aeronaut. Sci.*, vol. 17, p. 540 - 550, 1950.
- [49] J. H. Argyris et D. W. Scharpf, « Finite elements in time and space », *Nucl. Eng. Des.*, vol. 10, n° 4, p. 456 - 464, 1969.
- [50] T. J. R. Hughes et G. M. Hulbert, « Space-time finite element methods for elastodynamics: Formulations and error estimates », *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 66, n° 3, p. 339 - 363, 1988.
- [51] C.-C. Chien et T.-Y. Wu, « A particular integral BEM/time-discontinuous FEM methodology for solving 2-D elastodynamic problems », *Int. J. Solids Struct.*, vol. 38, n° 2, p. 289 - 306, 2001.
- [52] S.-P. Simonaho, T. Lähivaara, et T. Huttunen, « Modeling of acoustic wave propagation in time-domain using the discontinuous Galerkin method – A comparison with measurements », *Appl. Acoust.*, vol. 73, n° 2, p. 173 - 183, 2012.
- [53] M. Käser et M. Dumbser, « An arbitrary high-order discontinuous Galerkin method for elastic waves on unstructured meshes - I. The two-dimensional isotropic case with external source terms », *Geophys. J. Int.*, vol. 166, n° 2, p. 855 - 877, 2006.
- [54] M. Dumbser et M. Käser, « An arbitrary high-order discontinuous Galerkin method for elastic waves on unstructured meshes – II. The three-dimensional », *Geophys. J. Int.*, vol. 167, n° 1, p. 319 - 336, 2006.
- [55] J. L. Cipolla, « Transient infinite elements for acoustics and shock », -Vol 84-2 *Des. Eng. Tech. Conf.*, vol. 84, n° 3 Part B, p. 113 - 127, 1995.
- [56] J. L. Cipolla et M. J. Butler, « Infinite elements in the time domain using a prolate spheroidal multipole expansion », *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 43, n° 5, p. 889 - 908, 1998.
- [57] R. J. Astley, J.-P. Coyette, et L. Cremers, « Three-dimensional wave-envelope elements of variable order for acoustic radiation and scattering. Part II. Formulation in the time domain », *J Acoust Soc Am*, vol. 103, n° 1, p. 64 - 72, 1998.

- [58] C. A. Brebbia, *The boundary element method for engineers*, London. Pentech Press, 1978.
- [59] W. J. Mansur et C. A. Brebbia, « Formulation of the boundary element method for transient problems governed by the scalar wave equation », *Appl. Math. Model.*, vol. 6, n° 4, p. 307 - 311, 1982.
- [60] E. Alarcon, C. Brebbia, et J. Dominguez, « The boundary element method in elasticity », *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 20, n° 9, p. 625 - 639, 1978.
- [61] C. C. Spyrakos et H. Antes, « Time domain boundary element method approaches in elastodynamics: a comparative study », *Comput. Struct.*, vol. 24, n° 4, p. 529 - 535, 1986.
- [62] C. A. Brebbia, J. C. F. Telles, et L. C. Wrobel, *Boundary Element Techniques Theory and Applications in Engineering*. Berlin and New York: Springer-Verlag, 1984.
- [63] D. Nardini et C. A. Brebbia, « A new approach to free vibration analysis using boundary elements », *Appl. Math. Model.*, vol. 7, n° 3, p. 157 - 162, 1983.
- [64] R. D. Ciskowski et C. A. Brebbia, *Boundary Elements in Acoustics*. London: Elsevier Applied Science, 1991.
- [65] P. K. Banerjee, S. Ahmad, et G. D. Manolis, « Transient elastodynamic analysis of three-dimensional problems by boundary element method », *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 14, n° 6, p. 939 - 949, 1986.
- [66] T. A. Cruse et F. J. Rizzo, « A direct formulation and numerical solution of the general transient elastodynamic problem. I », *J. Math. Anal. Appl.*, vol. 22, n° 1, p. 244 - 259, 1968.
- [67] D. M. Cole, D. D. Kosloff, et J. B. Minster, « A numerical boundary integral equation method for elastodynamics. I », *Seismol. Soc. Am.*, vol. 68, n° 5, p. 1331 - 1357, 1978.
- [68] J. L. Dohner, R. Shoureshi, et J. Bernhard, « Transient analysis of three-dimensional wave propagation using the boundary element method », *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 24, n° 3, p. 621 - 634, 1987.
- [69] A. S. M. Israil et P. K. Banerjee, « Advanced time-domain formulation of BEM for two-dimensional transient elastodynamics », *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 29, n° 7, p. 1421 - 1440, 1990.
- [70] S. Ahmad et P. K. Banerjee, « Time-domain transient elastodynamic analysis of 3-D solids by BEM », *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 26, n° 8, p. 1709 - 1728, 1988.
- [71] A. Peirce et E. Siebrits, « Stability analysis and design of time-stepping schemes for general elastodynamic boundary element models », *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 40, n° 2, p. 319 - 342, 1997.
- [72] B. Birgisson, E. Siebrits, et A. P. Peirce, « Elastodynamic direct boundary element methods with enhanced numerical stability properties », *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 46, n° 6, p. 871 - 888, 1999.

- [73] W. J. Mansur et C. A. Brebbia, « Numerical implementation of the boundary element method for two dimensional transient scalar wave propagation problems », *Appl. Math. Model.*, vol. 6, n° 4, p. 299 - 306, 1982.
- [74] H.-C. Wang et P. K. Banerjee, « Axisymmetric transient elastodynamic analysis by boundary element method », *Int. J. Solids Struct.*, vol. 26, n° 4, p. 401 - 415, 1990.
- [75] C.-C. Wang, H.-C. Wang, et G.-S. Liou, « Quadratic time domain BEM formulation for 2D elastodynamic transient analysis », *Int. J. Solids Struct.*, vol. 34, n° 1, p. 129 - 151, 1997.
- [76] H. B. Coda et W. S. Venturini, « A smooth fundamental solution for 3D time domain BEM formulations », *Trans. Model. Simul.*, vol. 12, p. 259 - 268, 1996.
- [77] J. A. Carrer et W. J. Mansur, « Space derivatives in the time domain BEM analysis for the scalar wave equation », *Eng. Anal. Bound. Elem.*, vol. 13, n° 1, p. 67 74, 1994.
- [78] J. Hadamard, *Lectures on Cauchy's Problem in Linear Partial Differential Equations*. Dover Phoenix Editions, 1952.
- [79] D. C. Rizos et D. L. Karabalis, « A time domain BEM for 3-D elastodynamic analysis using the B-spline fundamental solutions », *Comput. Mech.*, vol. 22, n° 1, p. 108 - 115, 1998.
- [80] A. Frangi, « "Causal" shape functions in the time domain boundary element method », *Comput. Mech.*, vol. 25, n° 6, p. 533 - 541, 2000.
- [81] G. Yu, W. J. Mansur, J. A. M. Carrer, et L. Gong, « A linear θ method applied to 2D time-domain BEM », *Commun. Numer. Methods Eng.*, vol. 14, n° 12, p. 1171 - 1179, 1998.
- [82] J. J. Pérez-Gavilan et M. H. Aliabadi, « A Galerkin boundary element formulation with dual reciprocity for elastodynamics », *International J. Numer. Methods Eng.*, vol. 48, n° 9, p. 1331 - 1344, 2000.
- [83] C. Zhang et A. Savaidis, « 3-D Transient Dynamic Crack Analysis by a Novel Time-Domain BEM », *CMES*, vol. 4, n° 5, p. 603 - 618, 2003.
- [84] C. Lubich, « Convolution quadrature and discretized operational calculus. I », *Numer. Math.*, vol. 52, n° 2, p. 129 - 145, 1988.
- [85] T. Ha-Duong, B. Ludwig, et I. Terrasse, « A Galerkin BEM for transient acoustic scattering by an absorbing obstacle », *Int. J. Numer. Methods Eng.*
- [86] P. H. L. Groenenboom, C. A. Brebbia, et J. J. De Jong, « New developments and engineering applications of boundary elements in the field of transient wave propagation », *Eng. Anal.*, vol. 3, n° 4, p. 201 - 207, 1986.
- [87] G. Sylvand, « Équation des Ondes en Acoustique - Accélération des Potentiels Retardés par la Méthode Multipôle Temporelle », Rapport de recherche inria-00071567, version 1, 2003.
- [88] D. C. Rizos et S. Zhou, « An advanced direct time domain BEM for 3-D wave propagation in acoustic media », *J. Sound Vib.*, vol. 293, n° 1-2, p. 196 - 212, 2006.

- [89] S. Beyer, C. Zhang, S. Hirose, J. Sladek, et V. Sladek, « A 2-D hypersingular time-domain BEM for dynamic crack analysis in generally anisotropic solids », *Struct. Durab. Health Monit.*, vol. 3, n° 3, p. 177 - 189, 2007.
- [90] M. Wünsche, C. Zhang, M. Kuna, S. Hirose, J. Sladek, et V. Sladek, « A hypersingular time-domain BEM for 2D dynamic crack analysis in anisotropic solids », *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 78, n° 2, p. 127 - 150, 2009.
- [91] M. Wünsche, C. Zhang, J. Sladek, V. Sladek, S. Hirose, et M. Kuna, « Transient dynamic analysis of interface cracks in layered anisotropic solids under impact loading », *Int. J. Fract.*, vol. 157, n° 1-2, p. 131 - 147, 2009.
- [92] M. Wünsche et C. Zhang, « Transient dynamic crack analysis in piecewise homogeneous, anisotropic and linear elastic composites by a spatial symmetric Galerkin-BEM », *Comput. Mech. Fract. Damage*, vol. 77, n° 18, p. 3670 - 3686, 2010.
- [93] O. C. Zienkiewicz, D. W. Kelly, et P. Bettess, « The coupling of the finite element method and boundary solution procedures », *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 11, n° 2, p. 355 - 375, 1977.
- [94] O. Estorff et M. J. Prabucki, « Dynamic response in the time domain by coupled boundary and finite elements », *Comput. Mech.*, vol. 6, n° 1, p. 35 - 46, 1990.
- [95] W. J. Mansur, Y. Guoyou, J. A. M. Carrer, S. T. Lie, et E. F. N. Siqueira, « The θ scheme for time-domain BEM/FEM coupling applied to the 2-D scalar wave equation », *Commun. Numer. Methods Eng.*, vol. 16, n° 6, p. 439 - 448, 2000.
- [96] D. Soares Jr., W. J. Mansur, et O. Von Estorff, « An efficient time - domain FEM/BEM coupling approach based on FEM implicit Green's functions and truncation of BEM time convolution process », *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 196, n° 9-12, p. 1816 - 1826, 2007.
- [97] D. Soares et W. J. Mansur, « A time domain FEM approach based on implicit Green's functions for non-linear dynamic analysis », *International J. Numer. Methods Eng.*, vol. 62, n° 5, p. 664 - 681, 2005.
- [98] D. Soares Jr et W. J. Mansur, « Compression of time-generated matrices in two-dimensional time-domain elastodynamic BEM analysis », *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 61, n° 8, p. 1209 - 1218, 2004.
- [99] S. Ahmad et G. D. Manolis, « Dynamic analysis of 3-D structures by a transformed boundary element method », *Comput. Mech.*, vol. 2, n° 3, p. 185 - 196, 1987.
- [100] F. J. Rizzo, D. J. Shippy, et M. Rezayat, « A boundary integral equation method for radiation and scattering of elastic waves in three dimensions », *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 21, n° 1, p. 115 - 125, 1985.
- [101] G. V. Narayanan et D. E. Beskos, « Numerical operational methods for time-dependent linear problems », *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 18, n° 12, p. 1829 - 1854, 1982.
- [102] B. Davies et B. Martin, « Numerical inversion of the Laplace transform: a survey and comparison of methods », *J. Comput. Phys.*, vol. 33, n° 1, p. 1 - 32, 1979.

- [103] F. Durbin, « Numerical Inversion of Laplace Transforms: An Efficient Improvement to Dubner and Abate's Method », *Comput. J.*, vol. 17, n° 4, p. 371 - 376, 1974.
- [104] A. Papoulis, « A new method of inversion of the Laplace transform », *Quart Appl Math.*, vol. 14, p. 405 - 414, 1957.
- [105] D. J. Wilcox et I. S. Gibson, « Numerical Laplace transformation and inversion in the analysis of physical systems », *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 20, n° 8, p. 1507 - 1519, 1984.
- [106] C.-H. Lee, L. H. Royster, et R. D. Ciskowski, « Formulation for an FE and BE coupled problem and its application to the earmuff-earcanal system », *Eng. Anal. Bound. Elem.*, vol. 16, n° 4, p. 305 - 315, 1995.
- [107] L. Gaul, M. Schanz, et C. Fiedler, « Viscoelastic formulations of BEM in time and frequency domain », *Eng. Anal. Bound. Elem.*, vol. 10, n° 2, p. 137 - 141, 1992.
- [108] Y. Huang, S. G. Mogilevskaya, et S. L. Crouch, « Numerical modeling of micro- and macro-behavior of viscoelastic porous materials », *Comput. Mech.*, vol. 41, n° 6, p. 797 - 816, 2008.
- [109] S. M. Hasheminejad, R. Shakeri, et S. Rezaei, « Vibro-acoustic response of an elliptical plate-cavity coupled system to external shock loads », *Appl. Acoust.*, vol. 73, n° 8, p. 757 - 769, 2002.
- [110] T. Nishigaki, T. Ohyama, et M. Endo, « A Study of the Transient Sound Radiated by Impacted Solid Bodies Based on the Boundary Element Method », *JSME Int. J. Ser C Dyn. Control Robot. Des. Manuf.*, vol. 39, n° 2, p. 218 - 224, 1996.
- [111] E. Pan, C. Sassolas, B. Amadei, et T. Pfeffer, « A 3-D boundary element formulation of viscoelastic media with gravity », *Comput. Mech.*, vol. 19, n° 4, p. 308 - 316, 1997.
- [112] A.-V. Phan, L. J. Gray, et A. Salvadori, « Transient analysis of the dynamic stress intensity factors using SGBEM for frequency-domain elastodynamics », *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 199, n° 45-48, p. 3039 - 3050, 2010.
- [113] Y. Sogabe, M. Nakano, K. Kishida, et M. Tsuzuki, « Finite element analysis of dynamic behavior of viscoelastic materials using FFT », *JSME Int. J. Ser. Mech. Mater. Eng.*, vol. 39, n° 1, p. 71 - 77, 1996.
- [114] K. E. Barrett et A. C. Gotts, « Finite element analysis of a compressible dynamic viscoelastic sphere using FFT », *Comput. Struct.*, vol. 80, n° 20-21, p. 1615 - 1625, 2002.
- [115] K. E. Barrett et A. C. Gotts, « FEM for one- and two-dimensional viscoelastic materials with spherical and rotating domains using FFT », *Comput. Struct.*, vol. 82, n° 2-3, p. 181 - 192, 2004.
- [116] R. J. Astley, « Transient wave envelope elements for wave problems », *J. Sound Vib.*, vol. 192, n° 1, p. 245 - 261, 1996.
- [117] S. S. Dey et V. Tirumala Rao, « Transient response of circular plates and membranes: A numerical approach », *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 39, n° 12, p. 1405 - 1413, 1997.

- [118] M. Schanz, « A boundary element formulation in time domain for viscoelastic solids », *Commun. Numer. Methods Eng.*, vol. 15, n° 11, p. 799 - 809, 1999.
- [119] G. D. Manolis, « A comparative study on three boundary element method approaches to problems in elastodynamics », *Int. J. Numer. Methods Eng. Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 19, n° 1, p. 73 - 91, 1983.
- [120] K. K. Chan et P. A. Heng, « Time domain boundary element method for acoustic scattering problems with frequency dependent reflective surface », *Trans. Model. Simul.*, vol. 27, 2001.
- [121] S.-H. Choi, T. Igusa, et J. D. Achenbach, « Acoustic radiation from a finite-length shell with substructures subjected to an impulsive load », *Wave Motion*, vol. 22, n° 3, p. 259 - 277, 1995.
- [122] T. Zhu, J.-D. Zhang, et S. N. Atluri, « A local boundary integral equation (LBIE) method in computational mechanics, and a meshless discretization approach », *Comput. Mech.*, vol. 21, n° 3, p. 223 - 235, 1998.
- [123] T. Zhu, J. Zhang, et S. N. Atluri, « A meshless numerical method based on the local boundary integral equation (LBIE) to solve linear and non-linear boundary value problems », *Eng. Anal. Bound. Elem.*, vol. 23, n° 5-6, p. 375 - 389, 1999.
- [124] J. Sladek, V. Sladek, et R. Van Keer, « Meshless local boundary integral equation method for 2D elastodynamic problems », *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 57, n° 2, p. 235 - 249, 2003.
- [125] E. J. Sellountos et D. Polyzos, « A meshless local boundary integral equation method for solving transient elastodynamic problems », *Comput. Mech.*, vol. 35, n° 4, p. 265 - 276, 2005.
- [126] C. Hérault, « Vers une simulation sans maillage des phénomènes électromagnétiques », Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, Grenoble, 2000.
- [127] E. J. Sellountos, A. Sequeira, et D. Polyzos, « A new LBIE method for solving elastodynamic problems », *Eng. Anal. Bound. Elem.*, vol. 35, n° 2, p. 185 - 190, 2011.
- [128] B. F. G. Katz, « Boundary element method calculation of individual head-related transfer function. I. Rigid model calculation », *J Acoust Soc Am*, vol. 110, n° 5, p. 2440 - 2448, 2001.
- [129] R. V. Algazi, R. O. Duda, R. Duraiswani, N. A. Gumerov, et Z. Tang, « Approximating the head-related transfer function using simple geometric models of the head and torso », *J Acoust Soc Am*, vol. 112, n° 5, p. 2053 - 2064, 2002.
- [130] J.-M. Nicolas, « Les approches temporelles en imagerie cohérente », 2008D017, 2008.
- [131] C. Stavrinidis, M. Witting, S. I. Ikoss, et M. Klein, « Advancements in vibroacoustic evaluation of satellite structures », *Acta Astronaut.*, vol. 48, n° 4, p. 203 - 210, 2001.
- [132] P. Gerstoft, « CABRILLO: Acoustic, elastic and poroelastic finite difference modelling », 2002. Repéré à <http://www.mpl.ucsd.edu/people/pgerstoft/cabrillo/cabrillo.html> [Dernière consultation : 01-oct-2012].

- [133] U. K. Kaul, « Modeling and Simulation of Normal and Damage Vibration Signatures of Idealized Gears », *Struct. Health Monit.*, vol. 8, n° 1, p. 17 - 28, 2009.
- [134] Y. Li et O. B. Matar, « Convolutional perfectly matched layer for elastic second-order wave equation », *J Acoust Soc Am*, vol. 127, n° 3, p. 1318 - 1327, 2010.
- [135] Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis (ISL), « Protection of Military Personnel against Noise and Blast waves ». Repéré à <http://www.isl.eu/index.php/protection-technologies-security-situational-awareness/protection-of-military-personnel-against-noise-and-blast-waves> [Dernière consultation : 28-mars-2013].
- [136] A. Dancer, K. Buck, P. Hamery, et G. Parmentier, « Hearing protection in the military environment », *Noise Health*, vol. 2, n° 5, p. 1 - 15, 1999.
- [137] A. Dancer, K. Buck, P. Hamery, et V. Zimpfer-Jost, « Protection and communication in extreme environments », in *ICBEN 2003 proceedings*, Rotterdam, Netherlands, 2003.
- [138] P. Hamery, K. Buck, et V. Zimpfer, « Les équipements de protection individuelle contre le bruit en milieu opérationnel militaire: Partie 2: Dualité protection et communication », *Acoust. Tech. CIDBSFA*, vol. 66, p. 15 - 19, 2011.
- [139] Occupational Safety & Health Administration, « Hearing Conservation Program for Construction Workers », 2002. Repéré à http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_id=17368&p_table=FEDE RAL_REGISTER [Dernière consultation : 28-mars-2013].
- [140] W. J. Murphy et C. A. Kardous, « Attenuation measurements of passive linear and nonlinear hearing protectors for impulse noise », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 113, n° 4, p. 2195 - 2196, 2003.
- [141] W. J. Murphy, G. A. Flamme, A. Khan, J. Echt, et B. C. Johnson, « Measurement of impulse peak insertion loss for five hearing protectors », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 129, n° 4, p. 2651, 2011.
- [142] C. A. Kardous, J. R. Franks, et R. R. Davis, « NIOSH/NHCA best-practices workshops on impulsive noise », *Noise Control Eng. J.*, vol. 53, n° 2, p. 53 - 60, 2005.
- [143] C. A. Kardous, R. D. Wilsson, C. S. Hayden, P. Szlapa, W. J. Murphy, et E. R. Reeves, « Noise exposure assessment and abatement strategies at an indoor firing range », *Appl. Occup. Environ. Hyg.*, vol. 18, n° 8, p. 629 - 636, 2003.
- [144] P. Fatone, R. L. Tubbs, et G. L. MacDonald, « Health Hazard Evaluation at Gulfstream Aerospace Corporation », 94-0425, 1995.
- [145] P. Marcotte, R. Oddo, J. Boutin, R. Boilley, H. Nélisse, P.-É. Boileau, P. Drouin, C. Sirard, et R. Daigle, « Industrie de la réparation automobile - Caractérisation du bruit et des vibrations émis par les outils portatifs », IRSST, Montréal, Études et recherches R-554, 2008.
- [146] A. Anwar, « Low Frequency Finite Element Modeling of Passive Noise Attenuation in Ear Defenders », Masters of Science, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2005.

- [147] C. James, « Finite Element Modeling and Exploration of Double Hearing », Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2006.
- [148] M. R. Stinson et S. M. Khanna, « Sound propagation in the ear canal and coupling to the eardrum, with measurements on model systems », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 85, n° 6, p. 2481 - 2491, 1989.
- [149] R. Z. Gan, B. Feng, et Q. Sun, « Three-Dimensional Finite Element Modeling of Human Ear for Sound Transmission », *Ann. Biomed. Eng.*, vol. 32, n° 6, p. 847 - 859, 2004.
- [150] M. R. Stinson et G. A. Daigle, « Comparison of an analytic horn equation approach and a boundary element method for the calculation of sound fields in the human ear canal », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 118, n° 4, p. 2405 - 2411, 2005.
- [151] R. Z. Gan, Q. Sun, B. Feng, et M. W. Wood, « Acoustic-structural coupled finite element analysis for sound transmission in human ear—Pressure distributions », *Med. Eng. Phys.*, vol. 28, n° 5, p. 395 - 404, 2006.
- [152] L. Demkowicz, P. Gatto, J. Kurtz, M. Paszyński, W. Rachowicz, E. Bleszyński, M. Bleszyński, M. Hamilton, C. Champlin, et D. Pardo, « Modeling of bone conduction of sound in the human head using hp-finite elements: Code design and verification », *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 200, n° 21-22, p. 1757 - 1773, 2011.
- [153] F. Vergara, S. N. Gerges, et R. S. Birch, « Numerical and experimental study of impulsive sound attenuation of an earmuff », *Sh*, vol. 9, n° 4-5, p. 245 - 251, 2002.
- [154] S. Gerges, F. Vergara, et R. Birch, « Finite element method (FEM) model for the hearing protector noise attenuation for impulsive noise », présenté à Inter-Noise, 2000.
- [155] A. Bockstael, B. de Grece, T. Van Renterghem, D. Botteldooren, W. D'Haenens, H. Keppler, L. Maes, B. Philips, F. Swinnen, et B. Vinck, « Verifying the attenuation of earplugs in situ: Method validation using artificial head and numerical simulations », *J. Acoust Soc Am*, vol. 124, n° 2, p. 973 - 981, 2008.
- [156] A. Bockstael, D. Botteldooren, et B. Vinck, « Verifying the attenuation of earplugs in situ: Variability of transfer functions among human subjects », présenté à European Conference on Noise Control, Paris, France, 2008, p. 2257 - 2262.
- [157] A. Bockstael, T. Van Renterghem, D. Botteldooren, W. D'Haenens, H. Keppler, L. Maes, B. Philips, F. Swinnen, et B. Vinck, « Verifying the attenuation of earplugs in situ: Method validation on human subjects including individualized numerical simulations », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 125, n° 3, p. 1479 - 1489, 2009.
- [158] A. Bockstael, D. Deschrijver, D. Botteldooren, T. Dhaene, et B. Vinck, « Digital Filters for Accurately Verifying the Performance of Hearing Protectors in Use », *Acta Acust. United Acust.*, vol. 96, n° 1, p. 168 - 178, 2010.
- [159] B. F. G. Katz, « Boundary element method calculation of individual head-related transfer function. II. Impedance effects and comparisons to real measurements », *J Acoust Soc Am*, vol. 110, n° 5, p. 2449 - 2455, 2001.

- [160] M. Otani et S. Ise, « A fast calculation method of the head-related transfer functions for multiple source points based on the boundary element method », *Acoust. Sci. Technol.*, vol. 24, n° 5, p. 259 - 266, 2003.
- [161] T. Walsh, L. Demkowicz, et R. Charles, « Boundary element modeling of the external human auditory system », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 115, n° 3, p. 1033 - 1043, 2004.
- [162] M. Otani et S. Ise, « Fast calculation system specialized for head-related transfer function based on boundary element method », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 119, n° 5, p. 2589 - 2598, 2006.
- [163] M. R. Bai et T.-C. Tsao, « Numerical Modeling of Head-Related Transfer Functions Using the Boundary Source Representation », *J. Vib. Acoust.*, vol. 128, n° 5, p. 594 - 603, 2006.
- [164] Y. Kahana et P. A. Nelson, « Boundary element simulations of the transfer function of human heads and baffled pinnae using accurate geometric models », *J. Sound Vib.*, vol. 300, n° 3-5, p. 552 - 579, 2007.
- [165] T. Huttunen, E. T. Seppälä, O. Kirkeby, A. Kärkkänen, et L. Kärkkänen, « Simulation of the transfer function for a head-and-torso model over the entire audible frequency range », *J. Comput. Acoust.*, vol. 15, n° 4, p. 429 - 448, 2007.
- [166] W. Kreuzer, P. Majdak, et Z. Chen, « Fast multipole boundary element method to calculate head-related transfer functions for a wide frequency range », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 126, n° 3, p. 1280 - 1290, 2009.
- [167] N. A. Gumerov, A. E. O'Donovan, R. Duraiswani, et D. N. Zotkin, « Computation of the head-related transfer function via the fast multipole accelerated boundary element method and its spherical harmonic representation », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 127, n° 1, p. 370 - 386, 2010.
- [168] T. Xiao et Q. H. Liu, « Finite difference computation of head-related transfer function for human hearing », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 113, n° 5, p. 2434 - 2441, 2003.
- [169] A. Ross et G. Ostiguy, « Propagation of the initial transient noise from an impacted plate », *J. Sound Vib.*, vol. 301, n° 1-2, p. 28 - 42, 2007.
- [170] D. Granger et A. Ross, « Effects of partial constrained viscoelastic layer damping parameters on the initial transient response of impacted cantilever beams: Experimental and numerical results », *J. Sound Vib.*, vol. 321, n° 1-2, p. 45 - 64, 2009.
- [171] J.-F. Blais et A. Ross, « Forward projection of transient sound pressure fields radiated by impacted plates using numerical Laplace transform », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 125, n° 5, p. 3120 - 3128, 2009.
- [172] A. Cabrini, M. Diligenti, et G. Maier, « Boundary integral equation analysis in linear viscoelasticity: variational and saddle point formulations », *Comput. Mech.*, vol. 8, n° 2, p. 87 - 98, 1991.
- [173] S. S. Lee et Y. J. Kim, « Time-domain boundary element analysis of cracked linear viscoelastic solids », *Eng. Fract. Mech.*, vol. 51, n° 4, p. 585 - 590, 1995.

- [174] S. S. Lee et R. A. Westmann, « Application of high-order quadrature rules to time-domain boundary element analysis of viscoelasticity », *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 38, n° 4, p. 607 - 629, 1995.
- [175] M. Schanz et H. Antes, « A new visco- and elastodynamic time domain boundary element formulation », *Comput. Mech.*, vol. 20, n° 5, p. 452 - 459, 1997.
- [176] L. Gaul et M. Schanz, « A comparative study of three boundary element approaches to calculate the transient response of viscoelastic solids with unbounded domains », *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 179, n° 1-2, p. 111 - 123, 1999.
- [177] Z. E. A. Fellah et C. Depollier, « Transient acoustic wave propagation in rigid porous media: A time-domain approach », *J Acoust Soc Am*, vol. 107, n° 2, p. 683 - 688, 2000.
- [178] Z. E. A. Fellah et C. Depollier, « On the Propagation of Acoustic Pulses in Porous Rigid Media: A Time-Domain Approach », *J. Comput. Acoust.*, vol. 9, n° 3, p. 1163 - 1173, 2001.
- [179] Z. E. A. Fellah, M. Fellah, W. Lauriks, et C. Depollier, « Direct and inverse scattering of transient acoustic waves by a slab of rigid porous material », *J Acoust Soc Am*, vol. 113, n° 1, p. 61 - 72, 2003.
- [180] Z. E. A. Fellah, M. Fellah, W. Lauriks, C. Depollier, J.-Y. Chapelon, et Y. C. Angel, « Solution in time domain of ultrasonic propagation equation in a porous material », *Wave Motion*, vol. 38, n° 2, p. 151 - 163, 2003.
- [181] Z. E. A. Fellah, S. Berger, W. Lauriks, C. Depollier, C. Aristégui, et J.-Y. Chapelon, « Measuring the porosity and the tortuosity of porous materials via reflected waves at oblique incidence », *J Acoust Soc Am*, vol. 113, n° 5, p. 2424 - 2433, 2003.
- [182] M. Fellah, Z. E. A. Fellah, et C. Depollier, « Transient wave propagation in inhomogeneous porous materials: Application of fractional derivatives », *Signal Process.*, vol. 86, n° 10, p. 2658 - 2667, 2006.
- [183] Z. E. A. Fellah, F. G. Mitri, M. Fellah, E. Ogam, et C. Depollier, « Ultrasonic characterization of porous absorbing materials: Inverse problem », *J. Sound Vib.*, vol. 302, n° 4-5, p. 746 - 759, 2007.
- [184] E. Ogam, Z. E. A. Fellah, J.-P. Groby, A. Wirgin, et C. Depollier, « Résolution de problèmes inverses d'estimation de paramètres poroélastiques des matériaux poreux par inversion de données ultrasonores transmises », présenté à 10ème Congrès Français d'Acoustique, Lyon, 2010.
- [185] Z. E. A. Fellah, N. Sebaa, M. Fellah, F. G. Mitri, et C. Depollier, « Ultrasonic characterization of air-saturated double-layered porous media in time domain », *J. Appl. Phys.*, vol. 108, n° 014909, p. 1 - 10, 2010.
- [186] F. Dubois, A. C. Galucio, et N. Point, « Introduction à la dérivation fractionnaire. Théorie et applications. », *Tech. Ing.*, 2010.
- [187] R. L. Bagley et P. J. Torvik, « On the Fractional Calculus Model of Viscoelastic Behavior », *J. Rheol.*, vol. 30, n° 1, p. 133 - 155, 1986.

- [188] A. Al Jarbouh, « Rheological Behaviour Modelling of Viscoelastic Materials by Using Fractional Model », *Energy Procedia*, vol. 19, p. 143 - 157, 2012.
- [189] J. F. Allard et N. Atalla, *Propagation of Sound in Porous Media: modelling Sound Absorbing Materials*. Wiley, 2009.