

ED SMAER

Sujet de thèses 2014

Laboratoire : Institut Jean Le Rond d'Alembert

Etablissement de rattachement : Université Pierre et Marie Curie

Directeur de thèse et section CNU ou CNRS : **F. Coulouvrat** (DR2 CNRS, HDR, section CNRS n°9)

Codirection et section CNU ou CNRS : **R. Marchiano** (PR UPMC, section CNU n° 60)

Titre de la thèse : **Propagation d'ondes de choc de cisaillement dans le cerveau: modélisation et simulation des traumatismes**

Collaborations dans le cadre de la thèse : University of North Carolina at Chapel Hill - USA (Gianmarco Pinton, Professor)

Résumé du sujet :

Les tissus biologiques, à l'exception de l'os, présentent des propriétés mécaniques spécifiques de milieux quasi incompressibles, avec des vitesses des ondes de cisaillement de l'ordre de quelques m/s, trois ordres de grandeur inférieures à celles des ondes de compression (autour de 1500 m/s). Cette faible vitesse induit des effets non linéaires très importants car les nombres de Mach correspondants sont significatifs (proches de l'unité). L'étude des ondes de choc de cisaillement dans les solides mous est un domaine de recherche émergent depuis moins de 10 ans, avec les premières observations expérimentales en 2003. Un domaine d'application essentiel est la mécanique des traumatismes, crâniens notamment. Ceux-ci sont une cause majeure de décès ou d'invalidité notamment chez les jeunes adultes. Quand la tête est soumise à un impact ou une accélération violente, par exemple en cas de chute ou d'accident de la circulation, les ondes de choc élastiques peuvent se propager dans le cerveau. Les gradients violents résultant peuvent cisailier ou endommager les neurones, déclenchant une cascade biochimique qui peut prendre plusieurs jours avant de se développer en lésion cérébrale. La modélisation, la simulation et l'expérimentation des forts gradients résultant des ondes de choc peuvent complètement modifier les estimations actuelles des contraintes mécaniques et de l'endommagement actuellement réalisées (par des simulations éléments finis en élasticité linéaire). Par ailleurs, les effets de réflexion non linéaire à l'interface cerveau / crâne, généralisant la notion de réflexion de Mach au cas cisailé, sont également à prendre en compte.

Si les ondes de choc et les non-linéarités sont bien connues pour les ondes de compression notamment en aérodynamique ou en acoustique non linéaire, beaucoup moins d'études ont été consacrées à l'élasticité non linéaire en régime dynamique dans les solides mous. Les méthodes actuelles sont principalement des observations expérimentales en régime quasi statique (fréquence inférieure à 0.5 Hz) avec une approche mécanique classique. La thèse vise à explorer le régime dynamique beaucoup moins connu de la propagation d'onde (fréquence supérieure à 50 Hz) pour lequel aucune caractérisation ni modèle n'existe. L'objectif de la thèse est donc de quantifier l'importance des non-linéarités lors de la propagation d'ondes de choc dans le cerveau, aussi bien lors de la propagation en volume que lors des réflexions en surface. Les résultats de cette thèse pourraient donc potentiellement modifier profondément la vision mécanique des traumatismes. Ces applications ne sont pas limitées au seul cerveau et pourraient être étendues à d'autres traumatismes du corps humain, par exemple ceux de la moëlle épinière.

Sujet développé

Contexte

Les dommages résultant de traumatismes crâniens (en anglais Traumatic Brain Injury, TBI) sont une cause majeure de mortalité et d'invalidité partout dans le monde. Selon une étude européenne, 51% des traumatismes crâniens sont causés par des accidents de circulation de véhicules à moteur, suivi par les chutes et les agressions. Les TBI sont un facteur significatif dans la moitié des décès par traumatisme. Ils induisent chez les enfants et jeunes adultes des incapacités de longue durée dans plus de 25% des cas. En raison de leur impact prédominant dans les populations jeunes, les TBI sont la première cause d'invalidité en nombre d'années cumulé.

Les TBI se produisent en raison de la compression, tension ou cisaillement des tissus composant le cerveau, soit directement à la suite d'un impact crânien, soit par une accélération violente de la tête. Les dommages peuvent se produire au point d'impact du cerveau avec le crâne (lésion focale) ou au contraire sur une zone plus étendue à l'intérieur du volume cérébral, ce qui, dans les cas sévères, induit des lésions diffuses dans la matière blanche. Peu de choses sont connues sur la propagation des ondes de choc dans le cerveau. On fait ici l'hypothèse selon laquelle les gradients violents résultant des ondes de choc cisailent les tissus et endommagent les axones, ce qui conduit à des lésions axonales diffuses. L'absence de méthodes cliniques pour imager et diagnostiquer ces lésions est notamment une des raisons majeures pour lesquelles elles demeurent mal connues.

Compétences

Le candidat devra faire preuve d'un haut degré de compétence en mécanique des solides, physique des ondes et modélisation. Une part significative de la thèse sera dédiée au développement, à la réalisation et à l'interprétation de simulations numériques tridimensionnelles non linéaires intensives. Une participation aux activités expérimentales menées en partenariat et au traitement des données résultant est également attendu.

Modélisation et simulation

Les tissus biologiques, à l'exception de l'os, présentent des propriétés mécaniques spécifiques de milieux quasi incompressibles, avec des vitesses des ondes de cisaillement de l'ordre de quelques m/s, trois ordres de grandeur inférieures à celles des ondes de compression (autour de 1500 m/s). Dans un premier temps, la modélisation considérera que les 2 modes se propagent indépendamment. Sous cette hypothèse, nous avons d'ores et déjà établi et résolu numériquement une équation des ondes de cisaillement non linéaire scalaire dans l'approximation paraxiale en polarisation linéaire transverse. Le cas de la focalisation d'un choc induit par la courbure du crâne a été étudié dans ce cadre (thèse de B. Giammarinaro en cours), ainsi que la réflexion non linéaire de type Mach (Pinton et al. 2010).

Dans le cas général 3D, on conservera l'hypothèse de séparation des modes. On développera alors dans un premier temps une formulation (en déplacement ou en vitesse) vectorielle de la propagation non linéaire en cisaillement pur mais sans hypothèse simplificatrice sur une polarisation privilégiée ou sur une approximation paraxiale. Le problème sera formulé de manière la plus adaptée au traitement numérique des non-linéarités, afin d'intégrer celles-ci dans un logiciel 3D de propagation linéaire par méthode Galerkin discontinue (DG) d'ores et déjà développé à d'Alembert (thèse d'A. Luca). Les méthodes DG sont une classe de méthodes numériques réunissant des propriétés des éléments finis et des volumes finis. Au sein de chaque élément la solution est représentée par un polynôme (comme dans les éléments finis), et les flux inter-éléments sont calculés par des formulations adaptées (comme dans les volumes finis). Cette méthode est en particulier bien adaptée aux problèmes d'ondes, car elle permet d'atteindre des ordres élevés nécessaires pour minimiser les erreurs de dispersion numérique. Les méthodes spécifiques aux non-linéarités cubiques apparaissant en polarisation linéaire sont en cours d'implémentation à une et deux dimensions (thèse de B. Tripathi) et serviront de base à leur intégration 3D pendant la présente thèse. Le problème sera formulé afin de prendre en compte les hétérogénéités de la matière ou des interfaces constituant le cerveau. L'absorption des ondes dans le milieu devra également être modélisée par des modèles de relaxation

permettant d'ajuster le comportement mesuré en puissance de la fréquence (en f^α avec α autour de l'unité). La modélisation d'effets non linéaires associés à l'absorption pourra également être entreprise.

L'hypothèse de découplage des modes sera validée en analysant de manière détaillée le cas simple d'une réflexion à l'interface cerveau / crâne ou cerveau / fluide cérébro-spinal, éventuellement en régime linéaire uniquement, afin de quantifier la conversion de mode dans ce cas.

La géométrie du crâne et de la matière cérébrale seront issues de données IRM fournies par University of North Carolina (UNC). Les propriétés élastiques seront issues soit de mesures d'élastographie soit de données de la littérature.

Partie expérimentale

Les ultrasons peuvent être utilisés pour imager les ondes de cisaillement en tirant partie de la vitesse de celles-ci, très lentes comparées aux ondes de compression (facteur 1000 environ). Les déplacements en cisaillement peuvent être détectés par imagerie ultrasonore des tissus au moyen d'algorithmes spécifiques adaptés à la détection de déplacement submicrométrique le long de l'axe d'imagerie. Le mouvement résultant des ondes de choc de cisaillement peut de la sorte être observé dans l'ensemble du plan d'imagerie d'un échographe ultrasonore standard à haute fréquence d'images. Le doctorant participera à diverses campagnes d'expériences utilisant cette technique d'imagerie en conjonction avec des moyens d'excitation mécanique pour imager et quantifier la propagation non linéaire en profondeur (10 cm). La comparaison des simulations et des expériences permettra de valider les premières et de déterminer certains des paramètres non connus (paramètres de non-linéarité par exemple) dans le cerveau. Les applications biomédicales et les validations expérimentales seront réalisées à University of North Carolina at Chapel Hill sous la supervision de Gianmarco Pinton.

Retombées attendues

Les résultats de la thèse fourniront des résultats précieux en vue d'une meilleure compréhension et évaluation des dommages cérébraux dans les premiers jours consécutifs à un accident traumatique. Cette évaluation précoce est particulièrement prometteuse car certains examens (IRM) sont déconseillés pour les patients souffrant de tels traumatismes. Des images par tomographie par rayons X en conjonction avec une évaluation traumatologique de la zone d'impact, pourraient être utilisées comme données d'entrée d'un outil de simulation numérique prédictive qui calculerait l'environnement mécanique dans le cerveau. Ceci pourrait aider au diagnostic en localisant par prédiction numérique au stade précoce des zones à risque a) de lésions axonales diffuses actuellement indétectables, b) d'hémorragie cérébrale, c) de ramollissement hémorragique.