

Conclusion générale

Synthèse des travaux

Les travaux dont le présent mémoire a fait l'objet s'inscrivent dans le cadre de l'amélioration de l'autonomie des batteries des appareils d'aide à l'audition. Ils ont permis l'élaboration d'une nouvelle architecture optimisée de récupérateur d'énergie dédiée à la valorisation optimale de l'énergie de déformation mécanique du conduit auditif, résultant des mouvements de la mâchoire.

Nous avons tout d'abord établi un périmètre d'état de l'art élargi autour des méthodes d'optimisation des performances et de l'intégrabilité des applications nomades sur du corps humain. Nous avons notamment ciblé leur besoin énergétique et montré la pertinence de la récupération de l'énergie dissipée par les activités du corps humain dans ce cadre. Les verrous technologiques introduits par le contexte applicatif sur les systèmes de récupération ont été mis en avant, ainsi que les solutions apportées par la littérature. Plus particulièrement, nous avons montré que l'autonomie énergétique des appareils d'aide à l'audition pouvait être améliorée en exploitant la déformation mécanique du conduit auditif à l'aide d'une démarche méthodique au regard des solutions d'optimisation existantes.

Le second chapitre introduit alors le récupérateur hydro-piézoélectrique amplifié à conversion *frequency-up* visant à maximiser l'énergie récupérable depuis la déformation mécanique basse fréquence du conduit auditif. L'énergie est tout d'abord captée par un bouchon d'oreille moulé sur mesure et pressurisé sous fluide incompressible. Devenant ainsi une pompe avec les mouvements la mâchoire qui le déforment, le bouchon transmet l'énergie hydraulique simultanément à deux pistons hydrauliques au travers d'un découpleur hydraulique, un amplificateur hydraulique et deux valves hydrauliques. Dans une première phase de fonctionnement, un des pistons pousse la masse dynamique d'un oscillateur bistable depuis une de ses positions d'équilibre stable jusqu'à sa position d'équilibre instable. Dans une seconde phase, la masse bascule alors vers la position d'équilibre stable symétrique et oscille jusqu'à l'arrêt. L'oscillateur intègre un générateur piézoélectrique, constitué d'un flextenseur et d'un empilement de céramiques PZT, capable de convertir en partie l'énergie vibratoire de la masse dynamique en électricité. Le système est conçu pour cycler le mouvement de la masse, alternativement d'une position stable à l'autre, pour chaque fermeture de la mâchoire. À cet effet, nous avons introduit une nouvelle technologie de valves hydrauliques, basée sur le flambement en flexion de tubes flexibles, permettant de diriger le fluide sortant du bouchon d'oreille alternativement vers un des pistons, puis l'autre. Le cyclage du système est alors autonome, car le pilotage de l'ouverture des valves est assuré directement par la position de la masse dynamique. Le comportement multiphysique couplé des différents éléments

est ensuite mis en équation et un modèle numérique est établi pour en étudier son comportement et avoir une première estimation des performances du système qui promet alors, en théorie, un rendement de conversion global de 67%, avec un rendement de 79% pour le convertisseur électromécanique haute fréquence seul. De plus, la simulation système permet d'extraire le cahier des charges hydraulique des valves en imposant un rapport minimal $(r_{Cf})_{min}$ de 10 entre les pertes de charges hydrauliques de la branche fermée et celles de la branche qui actionne.

Le chapitre trois se concentre essentiellement autour de la caractérisation expérimentale du convertisseur électromécanique composé de l'oscillateur bistable implémentant le générateur piézoélectrique. Un modèle EF est alors établi pour son dimensionnement et sa conception tente de pallier les éventuels défauts pouvant être introduits durant sa fabrication. Un banc de caractérisation spécifique est mis en œuvre et les résultats expérimentaux sont corrélés au modèle théorique. Une dégradation des performances est observée, puisque le rendement du convertisseur électromécanique seul est estimé expérimentalement à 12.9%. Ce résultat peut provenir des légères ondulations locales des lames de l'oscillateur bistable, produites par sa fabrication et sa manipulation, mais aussi des imperfections de montage, induisant une réduction du facteur de qualité et du coefficient de couplage du convertisseur électromécanique. Malgré la basse de rendement, son comportement dynamique s'avère conforme à celui du modèle théorique.

Le chapitre quatre présente une stratégie d'approche expérimentale visant à dimensionner et concevoir les valves hydrauliques assurant le cyclage de la masse de l'oscillateur bistable. Ces dernières doivent rediriger le fluide sortant du bouchon d'oreille vers un piston spécifique en bloquant l'écoulement vers l'autre, alternativement pour chaque fermeture de mâchoire. La restriction hydraulique ainsi requise est générée à la section flambée de tubes en flexion sous l'action directe du mouvement de la masse de l'oscillateur bistable. Leur influence énergétique sur l'oscillateur bistable doit par ailleurs être minimisée pour maximiser la puissance générée. La valve est alors fabriquée en kapton pour sa grande résistance mécanique et sa souplesse offerte par de très faibles épaisseurs. Un banc de test statique est donc mis en œuvre pour caractériser la raideur en rotation d'échantillons de tubes en kapton. Une méthode de plastification locale y est présentée dans le but de réduire cette raideur, tout en conservant les fonctionnalités de la valve. Un banc de test hydraulique motorisé est ensuite mis en œuvre dans le but de caractériser les pertes de charges au travers de la section flambée des tubes kapton, en fonction de l'angle de flexion imposé. Le tube remplissant le critère statique du cahier des charges de la valve est alors caractérisé sur le banc hydraulique et il se révèle capable d'assurer le rapport $(r_{Cf})_{min} = 10$ pour le bon cyclage de la masse. Par ailleurs, nous avons caractérisé dans ce chapitre le comportement cinématique de la valve, intégrée sur l'oscillateur bistable, en fonction des mouvements de la masse. Nous avons notamment souligné l'influence positive des gaines rigides autour du tube kapton et nous avons établi les nouveaux systèmes d'équations liant la position de la masse à l'angle de flexion de la valve.

La répétabilité du processus de plastification rendant difficile la prédiction du comportement statique des valves, le chapitre cinq propose une stratégie d'approche théorique pour leur modélisation et leur dimensionnement. La caractérisation des pertes de charges, en fonction de l'angle de flexion post-flambement pour des tubes flexibles, ne possède cependant pas de modèle théorique à jour dans la littérature. La géométrie complexe de la section flambée est alors approximée à une

réduction, suivie d'une expansion conique, ce qui nous donne une relation entre le diamètre hydraulique à la section flambée du tube et le coefficient de pertes de charges qui est lié. Additionné au cahier des charges hydraulique de la valve, cela nous a aidé à calculer le diamètre hydraulique nécessaire à la section flambée, en fonction du diamètre initial du tube, pour assurer sa fermeture du point de vue de l'écoulement. Il reste alors à déterminer l'angle de flexion nécessaire pour atteindre le diamètre hydraulique de fermeture. Cela nous a mené à établir un modèle EF du tube kapton afin d'étudier son comportement cinématique et statique durant sa flexion. Une prospection préliminaire a révélé que pour maximiser l'étranglement hydraulique il faut maximiser le diamètre du tube, en minimisant son épaisseur. En revanche, pour minimiser sa raideur en rotation, minimiser son diamètre et surtout son épaisseur. Le couplage du modèle analytique de pertes de charges avec les données du modèle EF permettent de vérifier si un tube spécifique répond au cahier des charges hydraulique et statique de fonctionnement d'une valve. Enfin, les résultats du modèle théorique sont confrontés aux données expérimentales du chapitre précédent sur les deux aspects. Les ordres de grandeurs et les tendances des raideurs post-flambement des tubes sont similaires sur l'aspect statique. Le modèle théorique prédit des raideurs plus importantes avant le flambement, à causes notamment des conditions limites du modèle qui n'incluent pas le contact mécanique extérieur de la masse. De plus, les tendances sur l'aspect hydraulique sont similaires, mais les ordres de grandeurs théoriques sont nettement plus faibles devant les données expérimentales. Les différences sont notamment dues à l'hypothèse de simplification géométrique qui semble trop éloignée de la réalité, ainsi qu'à la méthode de fabrication artisanale des valves pouvant induire des défauts de fabrication. Le modèle théorique du comportement des valves n'est donc pas suffisamment réaliste pour être utilisé pour un dimensionnement, c'est pourquoi le modèle global sera complété préférentiellement avec les données expérimentales.

Le dernier chapitre, nous rassemblons les données de caractérisations expérimentales de l'oscillateur bistable, du générateur piézoélectrique et des valves hydrauliques pour l'établissement d'un modèle prédictif plus réaliste du comportement du récupérateur présenté dans cette thèse. Nous mettons d'abord en avant la réduction de la bistabilité de l'oscillateur sous l'influence de la raideur croissante des valves. Suite à cela, nous donnons une méthode de redimensionnement du système mécanique solidaire composé des deux organes valve + oscillateur, afin de préserver l'énergie pouvant y être emmagasinée durant la poussée du piston. De plus, nous présentons les essais de caractérisations dynamiques du comportement oscillatoire de la masse sous l'influence des frottements contre la valve. Un modèle de frottement sec est alors proposé pour caractériser la dissipation énergétique au contact entre les deux composants. Un processus essais-erreurs permet ensuite, grâce au modèle système numérique, d'estimer la valeur du coefficient de frottement sec à 0.42 suite aux essais expérimentaux. Le rendement du convertisseur chute, en conséquence, à 2.6%. Par ailleurs, nous avons dressé un tableau récapitulatif de l'influence des paramètres du système sur son fonctionnement et sur son rendement. La complexité du couplage entre les paramètres est alors mise en évidence par les compromis devant être faits pour maximiser le rendement, en s'assurant que la dynamique du système soit préservée. Enfin, des pistes d'améliorations sont proposées pour améliorer le modèle prédictif, ainsi que pour réduire les dissipations énergétiques au contact entre la masse et la valve.

Voici un résumé de ce que le modèle global permet d'anticiper :

- Le couplage multiphysique entre tous les composants du système.
- Le confort de l'individu en fonction de l'entrée énergétique que propose son oreille.
- L'influence des valves hydrauliques à base de tubes flexibles sur le comportement statique et dynamique du convertisseur électromécanique.
- Les pertes de charges nécessaires dans une branche hydraulique pour favoriser l'écoulement vers l'autre branche.
- Le rendement de conversion énergétique de l'oscillateur bistable implémentant le générateur piézoélectrique, sous l'influence mécanique d'une valve hydraulique.
- L'influence des différents paramètres de réglage sur le rendement de conversion global, mais aussi sur le fonctionnement du système.

Voici, en revanche, un résumé de ce que le modèle global ne permet d'anticiper :

- Le rendement de conversion énergétique des composants qui n'ont pas été étudiés durant la thèse, à savoir, le découpleur et l'amplificateur hydrauliques.
- La réponse, en débit et en pression, du bouchon d'oreille face à l'impédance mécanique non linéaire de l'oscillateur bistable.
- La variabilité des amplitudes d'ouverture et de fermeture de la mâchoire pour un individu donné.

Perspectives

Ce doctorat a permis d'évaluer la faisabilité d'une nouvelle architecture de récupérateur d'énergie pour une source mécanique basse fréquence. Les résultats présentés introduisent par ailleurs des perspectives pouvant donner suite à ces travaux.

Le dimensionnement du système passe actuellement par de nombreux outils numériques tels que ANSYS mechanical, ANSYS Workbench, Matlab, Simulink ou LabVIEW. L'influence des paramètres multiphysiques sur le comportement du système a été établie dans la thèse, mais il serait intéressant de développer un réseau de neurones capable de calculer les paramètres de réglage optimaux du dispositif, en fonction de l'énergie et du critère de confort imposés. Celui-ci devrait être capable de communiquer entre les différents outils et réaliser le processus-essais erreurs au travers des fonctions de minimisation adéquates. Cela permettrait, d'une part, de faciliter et accélérer la démarche de développement et de compréhension du système, et d'autre part, de réduire les incertitudes sur les résultats de corrélations modèle-essais.

Le modèle prédictif du comportement hydrauliques des tubes flexibles flambés gagnerait en précision dans une étude dédiée au sujet. La fabrication de valves sans adaptateurs de diamètre réduirait par exemple les incertitudes de mesure sur le coefficient de pertes de charges dans une approche expérimentale. La stratégie théorique pourrait également gagner en précision à l'aide d'un modèle mécanique des fluides numérique couplé au modèle éléments finis statique établi

dans le chapitre cinq.

Le comportement du bouchon d'oreille est par ailleurs assimilable à celui d'une pompe. Cela ouvre un grand champ d'applications diverses pour le système développé dans nos travaux. Sa complexité rend favorable son utilisation à des échelles importantes et pour des densités de puissance d'entrée plus importantes, car alors le système peut s'affranchir des restrictions confort, de fragilité et d'encombrement.

Les surpressions dans les circuits hydrauliques (canalisations urbaines, industrielles, etc.) sont des causes récurrentes de l'endommagement des composants hydrauliques, mais aussi de la rupture des conduites. Le système hydrau-électromécanique développé ici pourrait servir d'absorbeur avec un découpleur hydraulique réglé sur le seuil de pression maximale admissible dans la conduite. Une mise en parallèle de multiples dispositifs réglés à des seuils de pression différents pourrait optimiser l'absorption. De plus, l'énergie générée pourrait servir à l'alimentation de capteurs autonomes autour du dispositif.

Par ailleurs, la force du système réside dans la transformation d'une force à sens unique, en une force dans deux sens opposés. Cela donne accès à des sources d'énergies intéressantes pour l'autonomie de dispositifs nomades. Par exemple, un bouton poussoir connecté pourrait être alimenté par la seule force générée par la pression sur celui-ci. Aussi, une balance autonome pourrait être alimentée par la force générée lorsque l'utilisateur monte dessus. Enfin, des applications médicales pourraient être envisagées dans les prothèses de jambes connectées, en exploitant la pression générée au sol lors de la marche.

Enfin, dans une vision plus large, il serait possible de se tourner vers des sources d'énergie alternatives pour l'alimentation des appareils d'aide à l'audition. La température constante dans le conduit auditif pourrait par exemple offrir une source d'énergie viable pour l'application. L'intégration de générateurs thermoélectriques est en effet favorable à la miniaturisation et de nombreuses solutions biocompatibles sont proposées dans la littérature. Une optimisation topologique et un guidage du flux thermique pourrait aussi être envisagée pour maximiser le gradient de température en plaçant les transducteurs thermiques à l'extérieur du conduit auditif.