

Mécanique des Systèmes

L'objectif du département en terme de recherches consiste à repenser les méthodologies de conception produits/procédés au travers de techniques telles que l'optimisation, la modélisation numérique et l'interaction avec les méthodes d'Intelligence Artificielle.

Dans plusieurs domaines de recherche, le Département a acquis des résultats tout à fait probants (contrats de recherche, thèses de doctorat, participation à des projets de recherche européens), qui contribuent à forger son **identité dans la communauté scientifique et industrielle.**

L'activité de recherche et de transfert du Département Mécanique des Systèmes est basée sur la modélisation mécanique et la simulation numérique des phénomènes intervenant dans les divers systèmes mécaniques complexes.

Cette activité s'inscrit dans une démarche fonctionnelle : repenser les méthodologies de conception produit/process à travers des techniques telles que l'optimisation et la fiabilité, pour des applications à la modélisation numérique de phénomènes multidisciplinaires et complexes (Matériaux composites, flambement, mise en forme, vibro-acoustique,...).

Elle s'appuie sur des collaborations avec des entreprises industrielles qui sont, en général, à l'origine des différents thèmes abordés.

Les activités de recherche du Département Mécanique des Systèmes sont orientées principalement vers des applications pour les deux grands secteurs :

- Aéronautique
- Automobile

De nombreux projets ont été réalisés au sein du département mécanique des systèmes, depuis son existence.

Nous citons ci dessous nos **principales contributions** :

- Projet Européen COMPOPT 1997–2000 "Optimisation des Structures Composites"
Partenaires : DOMEKO, MAYER, MCS, SIRENHA, SAMTECH, Université d'Aachen, Université de Liège, Université de Namur.
- Projet Européen FIORES II, 2000–2003, "Prise en compte des aspects esthétiques lors de la conception des produits"
Partenaires : Université de Kaiserslautern, BMW, SAAB, PININFARINA, Think3, SAMTECH, Formtech, ...
- Développement et validation d'un logiciel de recalage pour les essais dynamiques de route de véhicule automobile"
Partenaire : PSA
- "Modélisation de comportement de pieds élastique"
Partenaire : Paulstra
- "Mise au point et validation d'un logiciel de calcul Vibro–Acoustique"
Partenaires : STRACO, INRS
- "Analyse de sensibilité et conception fiabiliste d'un système mécanique"
Partenaire : Faurecia
- "Optimisation de la transparence acoustique de structures sandwich"
Partenaires : Saint Gobain vitrage, ESTACA
- "Développement d'une méthodologie fiabiliste de conception et d'optimisation de la section d'un fuselage en matériaux composites,
Partenaire : Airbus, Université Pierre et Marie Curie
- "Modélisation du comportement de pare-brise soumis à des sollicitations statiques et dynamiques "

Vous trouverez ci dessous la **liste des doctorants** ayant effectué leur thèse dans le département Mécanique des systèmes :

- Linda Behar, " Méthode d'aide à la conception optimale des systèmes multicorps : application au contrôle de la réponse d'éléments de suspension", 1998, collaboration, Université Pierre et Marie Curie.
- Franck Delcroix, " Contribution à la résolution des systèmes d'équations linéaires définies par intervalles : application à la prise en compte des incertitudes dans les calculs éléments finis standards", ", 1999, collaboration Université Pierre et Marie Curie.
- Hoang Trang–Luu, " Méthodes d'optimisation adaptées au crash", ", 2002, collaboration ESI, Université Pierre et Marie Curie
- Magali Olivier Mailhé, " Optimisation des structures composites auto–raidies : application à un barillet defuselage", collaboration Airbus, Université Pierre et Marie Curie, en cours.
- Plusieurs étudiants ont également effectué leur stage de DEA au sein de notre département :
- Amel Demri, " Analyse de sensibilité et conception fiabiliste d'un système mécanique", collaboration FAURECIA, Université de Technologie de Compiègne, 2005
- Amin Sbitti, "Optimisation de la transparence acoustique des structures sandwichs", Université Pierre et Marie Curie, 2005.
- N. Belamri, "Développement d'une loi simulant le comportement de l'interface armature béton", collaboration EDF, Université de technologie de Compiègne, 2001
- Jérôme Pavie, " Formulation du problème d'optimisation appliqué à l'emboutissage", collaboration Simtech, Université Pierre et Marie Curie, 1998

(Extrait du rapport d'activité 07–08 ou renvoie vers le rapport d'activité)

Méthodologie fiabiliste de conception et d'optimisation de la section d'un fuselage en matériau composite
Magali Olivier Mailhé, Samir Ben Chaabane, Georges Duvaut – Collaboration AIRBUS

Ce projet s'inscrit dans le cadre du projet de recherche en optimisation ADONIS (Automated Design Optimization and New Improvements of Structures) visant à supporter l'avant projet A30X d'AIRBUS. Il constitue également la base du travail de thèse de Magali Olivier Mailhé, encadré par Samir Ben Chaabane (PULV) et Françoise Léné (LM2S Paris VI).

L'objectif est de développer un outil dédié au dimensionnement et à l'optimisation d'un modèle de fuselage simplifié. La peau ainsi que les renforts constituant le fuselage sont en matériaux composites. L'ère du "tout composite" en aéronautique commence. Les annonces de Boeing à propos du 787 et d'AIRBUS à propos de l'A350 confirment cette évolution.

La généralisation de l'utilisation de ces matériaux conduit au développement d'un fuselage entier en matériaux composites. L'étude que nous menons porte sur le dimensionnement robuste en phase avant-projet d'un tronçon de fuselage simplifié. Le revêtement du fuselage est constitué d'éléments de coque composite avec un empilement explicite. Sur ces éléments de coque viennent se rattacher des éléments de poutres représentant, d'une part, les cadres (renforts orbitaux) et, d'autre part, les lisses (renforts longitudinaux). Un élément de poutre composite a été développé et utilisé pour modéliser les renforts, afin de réduire le temps calcul.

Des cas de charges représentant des sollicitations réelles sont modélisés : atterrissage dynamique, rafale de vent latérale à l'appareil, manœuvre verticale en vol. Les critères dimensionnants sont les charges et les modes de flambement (globaux ou locaux) ainsi que la réparabilité du composite et sa tolérance aux dommages.

Des ouvertures représentant les hublots ont été introduites. Ces ouvertures dégradent la résistance au flambement du fuselage. Des solutions techniques (adaptation des orientations des couches du composite) ont été proposées afin d'y remédier.

Une approche fiabiliste couplée à l'optimisation a été définie. En effet, les paramètres influant sur le comportement de la structure optimisée sont souvent sujets à des variations, qui peuvent influencer énormément la réponse de la structure. Ces approches fiabilistes sont aujourd'hui inévitables si nous voulons faire cohabiter performances optimales et coût minimal. La mise en place de ces approches nécessitant des coûts calculs trop élevés, nous avons utilisé des techniques de surface de réponse afin d'évaluer la probabilité de défaillance de la structure vis à vis du flambement.

Le processus adopté conduit à une conception admissible par rapport aux objectifs fixés par l'industriel. La conception

optimale obtenue assure une fiabilité acceptable par rapport à la variabilité des paramètres tout en limitant l'augmentation de la masse à 4%. En même temps la charge critique est améliorée de 160%.

Plusieurs communications ont été faites sur ce thème (voir liste de publications)

Modélisation multiéchelle des matériaux composites à fibres non alignées avec prise en compte de la plasticité.
S. Ben Chaabane, Collaboration I. Doghri Université Catholique de Louvain, L. Adam E-xstream

Les matériaux composites renforcés par des fibres courtes ou par des nano-inclusions ont beaucoup d'applications industrielles. L'objectif est d'analyser l'influence de la microstructure sur le comportement du composite. La prise en compte de renforts élasto-plastiques rend plus complexe la modélisation multi-échelle. Des méthodes semi-analytiques seront utilisées et comparées à des modèles éléments finis sur des éprouvettes standards. L'objectif de ce travail est de prédire, pour un composite à matrice élasto-plastique et renforts élastiques, le comportement macro-mécanique du composite. La surface d'écoulement plastique initiale ainsi que son évolution seront considérées. L'influence du type d'écrouissage ainsi que des lois d'écoulement plastique sur la surface de plasticité seront particulièrement étudiées. Une analyse paramétrique, portant sur la forme des renforts (aspect ratio), leur fraction volumique ainsi que leur orientation, est également menée.

Estimation de la durée de vie du câblage d'une portière automobile
S. Ben Chaabane, S.B. Kim, Collaboration HOSEO University, Corée du Sud.

Une étude de fatigue du câblage électrique situé entre la portière d'un véhicule et la caisse est menée. Cette étude comporte une partie expérimentale et une partie numérique. Ce type de câblage est soumis à des sollicitations répétitives correspondant à chaque ouverture et fermeture de la portière. Des défaillances (rupture du câblage) ont été constatées au bout d'un certain nombre d'années d'utilisation (ou de cycles d'utilisation). Le travail effectué permet de définir le processus de dimensionnement et de validation d'un câblage, se basant principalement sur sa durée de vie (aspect fatigue du matériau). Un dispositif expérimental permet l'estimation de cette durée de vie ou du nombre de cycles à rupture. Ces résultats expérimentaux ont été confrontés à des simulations numériques par éléments finis. Ce travail a été présenté au "4th International Conference on Advances in Structural Engineering and Mechanics", Jeju, Korea, mai 2008

Méthode numérique pour la prévision de la perte par transmission acoustique de plaques sandwichs. Effet de la température sur la transmission acoustique.
M. Guerich, Collaboration S. Assaf, ESTACA

L'objectif de ce travail est de mettre en œuvre une méthode numérique pour la prévision de la perte par transmission acoustique (Transmission Loss) des plaques sandwichs soumises à des ondes planes ou des champs diffus. La plaque sandwich est constituée d'un cœur viscoélastique et de deux peaux élastiques. Le modèle présenté est basé sur une formulation couplée: des éléments finis pour la plaque et des éléments finis de frontière pour le domaine acoustique. Le modèle éléments finis pour la plaque utilise l'hypothèse de Kirchhoff pour les faces et l'hypothèse de Mindlin pour le cœur. Les énergies de déformation et cinétique sont calculées en fonction des déplacements moyens axiaux, des déplacements relatifs des faces ainsi que du déplacement transversal de la plaque. Le champ diffus est modélisé par une superposition d'ondes planes indépendantes de même amplitude. Le système algébrique du problème vibro-acoustique obtenu est discrétisé en utilisant un élément fini triangulaire. La précision du modèle a été démontrée à travers des comparaisons avec des calculs analytiques et des résultats expérimentaux. De nouveaux résultats concernant l'effet de la température sur la transmission acoustique ont été mis en évidence. Les effets de la température sur la perte par transmission acoustique des plaques sandwichs sont également explorés. La dépendance des propriétés viscoélastiques du matériau vis-à-vis de la fréquence et de la température sont pris en compte à l'aide d'une courbe de la loi de comportement viscoélastique obtenue expérimentalement. Les résultats sont obtenus pour un verre feuilleté soumis à un champ acoustique diffus. Il a été constaté que la chute de la courbe du TL, à la fréquence de coïncidence de la plaque, n'apparaît plus pour les températures dont la fréquence est dans la région de transition du matériau viscoélastique utilisé. En effet, la valeur relativement faible du module de cisaillement et la valeur élevée du facteur de perte dans cette région induisent des déformations de cisaillement transversal du cœur viscoélastique, et donc des pertes d'énergie élevées. Les résultats de ces travaux ont été publiés au journal "Journal of Sandwich Structures and Materials", en Septembre 2008 et présentés à Acoustics'08.

Optimisation de la perte par transmission acoustique de structures sandwichs
M. Guerich, Collaboration S. Assaf, ESTACA

Les structures sandwich permettent d'obtenir un amortissement intéressant grâce aux propriétés du matériau viscoélastique, tout en gardant une épaisseur et un poids raisonnables. L'objectif ici est d'atténuer la pression acoustique transmise par une structure sandwich à travers l'indice d'affaiblissement acoustique ou perte par transmission acoustique (Transmission Loss : TL), en jouant sur les propriétés géométriques et physiques de chaque

matériau du sandwich. Les résultats obtenus lors de ce travail ont montré dans un premier temps, que les variations de la densité et de l'épaisseur du cœur n'apportent quasiment aucune amélioration significative au TL, alors que la variation du facteur de perte et du module de cisaillement permet de l'augmenter au voisinage des fréquences de résonances. Cette constatation nous a permis de réduire le nombre de variables de conception et de travailler uniquement sur le facteur de perte du cœur. Dans un deuxième temps, le processus d'optimisation du facteur de perte a montré que l'on peut obtenir, une préconisation préalable sur la loi de comportement du matériau viscoélastique du cœur, qui permet d'augmenter le TL et d'améliorer l'isolation phonique des structures sandwichs. Nous avons aussi effectué une étude paramétrique du TL sur les épaisseurs du cœur en se basant sur la loi de comportement issue de l'optimisation du facteur de perte et étudié l'influence de l'épaisseur du cœur sur le TL. Une partie des résultats de ces travaux a été publiée dans 12th AIAA/ISSMO2008 et l'ISMA08. Un article est en cours de préparation et sera être soumis fin 2008.

Une méthode de superposition modale pour la réponse vibro-acoustique des plaques sandwichs.
M. Guerich, Collaboration S. Assaf, ESTACA

Dans ce travail, une formulation basée sur la méthode des éléments finis, dédiée à la prédiction de la réponse vibro-acoustique des plaques sandwichs amorties, a été présentée. Afin de réduire la taille du système d'équations obtenu après discrétisation, une approche modale a été adoptée. Cette approche s'appuie sur les modes propres du système conservatif associé. Les amortissements modaux sont alors calculés à partir des énergies de déformations associées à chaque mode propre (modal strain energy method). Afin de réduire les temps de calcul de l'indice d'affaiblissement de la plaque, une interpolation fréquentielle de l'impédance de rayonnement du fluide a été utilisée. La validation de la formulation proposée est menée en confrontant les résultats obtenus aux résultats analytiques, numériques et expérimentaux trouvés dans la littérature. Les résultats montrent l'efficacité de la méthode en termes de précision et de temps de calcul. Les résultats de ces travaux ont été publiés dans VCB'08.

Développement d'un modèle élément fini B-spline de coque.
S. Bouabdallah, M. Guerich

Un modèle éléments finis basé sur une formulation en déplacement a été mis en œuvre. Il utilise les fonctions B-splines à la place des fonctions polynomiales couramment utilisées dans la méthode des éléments finis standard. Elle a l'avantage de bien représenter la géométrie avec un minimum de nœuds. Le champ de déplacement est aussi interpolé utilisant les fonctions B-splines. Ce qui permet une continuité C2 inter-élémentaire sans faire appel aux dérivées des déplacements comme degrés de liberté de l'élément. Ajouté au faible nombre de points et de mailles pour la géométrie, cette démarche permet de réduire considérablement la taille du système algébrique issu de la discrétisation par éléments finis. Cette méthode sera validée à travers des résultats analytiques de calcul des modes propres de structures minces.

Ces développements sont en cours d'intégration dans une plate-forme pédagogique. En effet, cette plate-forme est un environnement facilitant l'intégration et la validation de nouveaux modèles éléments finis. (voir 3.3.4)

Modélisation du comportement de pare-brise soumis à des sollicitations statiques et dynamiques.
S. Bouabdallah, Collaboration PSA

Dans le cadre de la modélisation du comportement de structures en verre feuilleté lors du choc d'un véhicule, PSA a mené une campagne d'essais expérimentaux sur des pare-brises dans des configurations voisines des situations de choc frontal ou de retournement du véhicule.

Deux types d'essais ont été réalisés lors de cette campagne :

- des essais caractérisant le comportement en flexion du pare-brise, par une sollicitation quasi-normale à la surface extérieure de ce dernier, et
- des essais caractérisant le comportement en compression du pare-brise par une sollicitation dans un plan reliant les bords supérieur et inférieur.

Ce projet concerne la simulation des essais de flexion et de compression menés par PSA basée sur l'utilisation de modèles éléments finis structuraux. Son but est de développer une méthodologie basée sur une nouvelle modélisation de coque afin de dégager le modèle reproduisant le plus fidèlement le comportement du pare-brise en explorant plusieurs modélisations. Il concerne également la comparaison, pour ces cas de sollicitation, des logiciels de calcul Radioss et Abaqus.

Après avoir dressé un état des lieux des différentes modélisations possibles, nous faisons une analyse critique des résultats obtenus et proposons un modèle moins couteux et plus précis que celui utilisé initialement. La modélisation proposée doit être étendue aux cas de sollicitations dynamiques (i.e. Chocs).

Ce travail a fait l'objet d'une communication lors du "2nd European Hyper Technology Conference" qui s'est tenue à Strasbourg les 30 septembre et 1er octobre 2008.

Le sujet consiste à modéliser l'expansion de la mousse de polymère au cours de la fabrication de pièces plastiques par le procédé de rotomoulage en utilisant un agent porogène chimique sous forme solide.

Cette modélisation est un sujet qui a intéressé les industriels depuis plusieurs années compte tenu de l'importance du rôle des mousses polymères dans les produits manufacturés.

L'innovation de ce travail consiste à modéliser le processus de moussage en prenant comme point de départ la modélisation du mécanisme de décomposition de l'agent porogène chimique.

Ceci permettra aux industriels de réduire les coûts et d'optimiser la production qui s'effectue encore dans un cadre empirique.

Cette modélisation permettra de contrôler le processus de moussage afin d'obtenir la structure souhaitée. Les résultats permettront de mieux comprendre certains phénomènes physiques spécifiques à ce procédé.

La taille des bulles, exprimée par l'évolution de son rayon au cours du procédé, dépend de la température et de la pression du gaz au sein de la bulle. La première étape consiste à modéliser la décomposition de l'agent porogène chimique qui constitue l'élément moteur du processus. L'expansion de la bulle est étudiée, en premier temps, à travers le modèle d'une cellule élémentaire constituée d'une bulle unique dans un milieu liquide visqueux infini afin de pouvoir traiter, dans un deuxième temps, l'expansion d'un échantillon de mousses contenant n bulles.

Il s'agit d'établir l'expression de l'évolution du rayon et celle de la pression au sein d'une bulle dans une cellule élémentaire en fonction du temps et des paramètres d'entrée.