

Répondant à un appel d'offre lancé par la **Direction de la Technologie du Ministère chargée de la Recherche** pour la création de « Campus Numériques », un groupe d'écoles d'ingénieurs et d'universités partenaires du réseau **AIP-PRIMECA** a entrepris de coordonner le développement de plusieurs modules dédiés à la formation à distance par auto apprentissage. Ce module « **Ingénierie du Crash dans les Véhicules de Transport** » fait partie intégrante de cette action.

L'ensemble de ce cours a été développé en étroite collaboration entre le **LAMIH** (Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique industrielles et Humaines – UMR CNRS 8530) de l'Université de Valenciennes et l'Unité RCS (Résistance et Conception des Structures) du Département Mécanique du Solide et de l'Endommagement de l'**ONERA-Centre de Lille** (Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales), tous deux partenaires de recherche de longue date.

Basée sur une expérience de plus de quinze années, acquise par nos activités de recherche dans le domaine du Crash et de l'Impact des véhicules de transport et plus récemment par nos activités liées à la Biomécanique du choc (prédiction du risque lésionnel de l'être humain en situation accidentogène), cette plate forme d'auto apprentissage est destinée aux étudiants de 3^{ème} cycle universitaires (DESS, DEA, MASTER ou jeunes Doctorants) et aux élèves de 3^{ème} année d'Ecole d'Ingénieurs désirant être initiés au vaste domaine de la sécurité passive dans les moyens de transport.

Ils trouveront dans ce support multimédia une présentation de certains outils mis en œuvre pour améliorer la sécurité des personnes transportées.

Organisé sur la base d'un schéma directeur, construit pas à pas durant la première partie du cours, les quatre grands secteurs d'investigation (Accidentologie, Biomécanique du Choc, Sécurité Primaire et Sécurité Secondaire) sont ensuite accessibles selon deux niveaux d'information :

- Niveau 1 : pour une information générale et synthétique,
- Niveau 2 : pour une information détaillée, exploitable sous forme de fichiers PDF imprimables.

Bien que de nombreux rappels soient effectués, les pré requis indispensables à la compréhension des théories présentées attirent pour l'essentiel à la Mécanique Générale, la Mécanique Analytique (Lagrangienne), la Dynamique des Systèmes Multicorps poly-articulés, la Méthode des Eléments Finis et au Comportement des Matériaux. Pour la partie Sécurité Secondaire, des notions d'anatomie humaine sont un plus.

De nombreux cas d'études, photos et animations illustrent les outils présentés et aident à la compréhension des théories sur lesquelles leur développement est basé. Pour les outils numériques, des démonstrateurs initient le lecteur pas à pas, à l'aide d'exemples simples, sur le cheminement à suivre pour mettre en données un modèle de simulation.

Les cas d'études présentés sont issus du monde industriel des quatre grands secteurs du transport (automobile, ferroviaire, aéronautique et naval) et nous ont été confiés par nos partenaires d'Etudes et de Recherches : **l'ONERA – Lille, ALSTOM Transport – Petite Forêt, PRINCIPIA MARINE – Nantes, le CEESAR (Centre Européen d'Etude sur la Sécurité et l'Analyse du Risque), le LAB Renault-PSA (Laboratoire d'Accidentologie et de Biomécanique), l'INRETS (Institut National de REcherche sur les Transports et leur**

Sécurité), **VISTEON** Intérieur – Harnes, le **LEDEPP ARCELOR - Florange** (Laboratoire d'Etude et de Développement des Produits Plats).

Cette version Béta, déjà évaluée en interne auprès des étudiants du **MASTER 2** Ingénierie Mécanique de l'**ISTV** (Institut des Sciences et Techniques de Valenciennes) et des élèves de 3^{ème} année de **P'ENSIAME** (Ecole Nationale Supérieure d'Informatique, Automatique, Mécanique et Energétique), est bien évidemment amenée à évoluer dans les années à venir.

Des Travaux Dirigés, dont le développement doit se poursuivre, un Questionnaire à Choix Multiples et un Questionnaire d'Evaluation sont mis à votre disposition pour vous aider dans cette démarche.

S'agissant d'une version d'évaluation au sein des partenaires AIP-PRIMECA, un certain nombre de photos et animations puisées sur des sites internet de constructeurs, équipementiers et instituts nationaux doivent encore faire l'objet d'une demande de cession d'un droit d'utilisation et de reproduction.

A la suite sont présentés le Plan Général du Cours et une indication d'Ordonnancement et de Planning horaire pour encadrer le cours et les TD/TP numériques le cas échéant. Les pré requis, objectifs à atteindre et capacités à développer y sont précisés. Une proposition d'étude de cas industriel, partitionnée en trois groupes voire trois sites différents, clos cette présentation. Les Travaux Pratiques ne sont qu'une indication et ne sont pas détaillés dans cette plate forme. Ils requièrent un code de calcul par Eléments Finis dédié à la dynamique non-linéaire (Pam-Crash, Radioss, LS-Dyna, Abaqus/Explicit, ...). Dans ce cours, c'est le code Pam-Crash, développé par la société ESI Group (Engineering System International), qui a été utilisé pour réaliser les exemples de démonstrateur de mise en données.

PLAN GENERAL DU COURS

(Eléments en rouge : en cours de développement)

1. Introduction et Généralités (construction du schéma directeur)

- . poser le contexte de la collision dans les véhicules de transport terrestre, aérien et maritime au travers des études d'accidentologie
- . introduire les notions de sécurité active et sécurité passive
- . sécurité passive :
 - . sécurité primaire : comportement au choc des structures
 - . absorber l'énergie du choc
 - . garantir l'intégrité de l'habitacle passagers
 - . éviter la dislocation de la structure
 - . maintenir des niveaux de décélération en adéquation avec la tolérance humaine
 - ⇒ introduire les outils disponibles
 - . sécurité secondaire : biomécanique de l'impact
 - . systèmes de retenue des passagers
 - . substituts de l'être humain (mannequins de choc)
 - . critères de tolérance
 - ⇒ introduire les outils disponibles

2. L'accidentologie

- . les objectifs
- . les outils et protocoles de recueil de données
- . les enseignements de l'accidentologie

3. Les outils de la Sécurité Primaire

3.1 Les grands principes de la sécurité primaire dans le domaine automobile, ferroviaire et aéronautique

- 3.1.1 l'évolution du dimensionnement des structures
- 3.1.2 la chronologie du comportement au choc de la structure

3.2 Conception des structures soumises à la collision

- 3.2.1 les outils de simulation numérique en approche globale
 - . rappel de la dynamique des systèmes multicorps
 - . outils de caractérisation du comportement des liaisons déformables
 - . compression axiale
 - . flexion pure
 - . outils de localisation spatiale des liaisons déformables (position, orientation et rationalisation des liaisons)

- ⇒ outil expert de conception au choc en approche globale
 - . MB-CRASH (2D, pas de localisation, corps rigides uniquement)
 - . PAM-CRASH (localisation 3D, modèles hybrides poutres/coques)

- ⇒ démonstrateur d'exemples d'application :
 - . Niveau 1 : absorbeur de choc axial type profilé Ω
impact pendulaire d'un profilé sur massif rigide
longerons automobiles simplifiés type poutre en « S »
 - . Niveau 2 : châssis de la cabine de conduite ERRI
enchevauchure des voitures ferroviaire DEV
collision tramway contre camion rigide

3.2.2 les outils de simulation numérique en approche locale

- . rappel de la Méthode des Eléments Finis en dynamique rapide

- . discrétisation du problème continu et équations du mouvement
- . schémas de résolution (comparatif explicite/implicite)
- . les éléments finis usuels en crash (beam, shell, solid)
- . notions de sous-intégration, risques et parades des modes de hourglass
- . la gestion du contact
- . les conditions initiales (VI, ACC, F)
- . les conditions aux limites (BC, RW, RB)
- . notions de grandes déformations et plasticité en mécanique
- . représentation des non-linéarités matérielles
 - . modèles de comportement
 - . plasticité
 - . viscoplasticité
 - . thermo-viscoplasticité
 - . endommagement et rupture
 - ⇒ spécificité des matériaux métalliques
 - ⇒ spécificité des matériaux composites
 - . identification des propriétés matérielles
 - ⇒ les essais expérimentaux requis
 - ⇒ les procédures d'identification paramétriques
- . représentation des non-linéarités géométriques (assemblages)
 - . la tenue mécanique des assemblages rivetés et soudés par points
 - . approche expérimentale
 - . approche numérique locale
 - . macro-éléments de liaisons rivetées et soudées par points
 - . critère de rupture macroscopique
 - . essais ARCAN et procédure d'identification paramétrique
- ⇒ organigramme de la mise en forme d'un problème de dynamique rapide
 - . conseils de discrétisation
 - . mises en garde des problèmes couramment rencontrés
 - . vérifications avant lancement du calcul
 - . exploitation des résultats
- ⇒ démonstrateur d'exemples d'application :
 - . Niveau 1 : contact balle/tamis
absorbeur de choc axial de type Ω
impact pendulaire d'un profilé sur massif rigide
longerons automobiles simplifiés type poutre en « S »
 - . Niveau 2 : châssis de la cabine de conduite ERRI
structure automobile
tronçon aéronautique riveté

4. Les outils de la Sécurité Secondaire

4.1 Les grands principes de la sécurité secondaire dans le domaine automobile

- 4.1.1 la chronologie des systèmes de retenue des passagers
- 4.1.2 la cinématique des passagers
- 4.1.3 les substituts de l'être humain (mannequins de choc frontaux et latéraux)
- 4.1.4 les critères biomécaniques de blessures et de tolérance humaine au choc
 - . expérimentations sur sujets vivants volontaires (faibles chocs)
 - . expérimentations sur sujets cadavériques
 - . expérimentations sur animaux
 - . limites des critères usuels

4.2 Composants participant à la sécurité secondaire

- . la ceinture de sécurité
- . les prétensionneurs
- . les airbags frontaux et latéraux
- . la colonne de direction
- . la planche de bord
- . le siège
- . l'appui tête

4.3 La simulation numérique du choc secondaire

- . les mannequins numériques frontaux et latéraux (EF et multicorps rigides)
- . la modélisation des systèmes de retenue et de l'environnement proche

⇒ organigramme de la mise en forme d'un problème de « safety »

- . conseils de modélisation
- . mises en garde des problèmes couramment rencontrés
- . exploitation des résultats

⇒ démonstrateur d'exemples d'application sur PAM-SAFE :

- . Niveau 1 : déploiement d'airbag
positionnement d'un mannequin
mise en place d'une ceinture
- . Niveau 2 : choc frontal
choc latéral

4.4 Les modèles de l'être humain et critères lésionnels du futur

- . modèle de l'être humain (HUMOS)
- . modèle de la tête humaine
- . critères lésionnels à venir

5. Tests et procédures d'essais sur structures, composants et éprouvettes

5.1 Les moyens d'essais et de mesures disponibles

- . pour la caractérisation des matériaux (barres de Hopkinson, vérin rapide, ...)
- . pour la vérification du comportement (puits de chute, catapulte, ...)

5.2 Les procédures d'essais à échelle 1 de qualification sur structures et composants

- 5.2.1 le choc frontal
 - . FMVSS 208
 - . ECE R94
- 5.2.2 le choc latéral
 - . FMVSS 214
 - . ECE R95
- 5.2.3 le choc arrière
- 5.2.4 le retournement
- 5.2.5 les tests EURO NCAP
- 5.2.6 le choc tête
 - . FMVSS 201
 - . ECE 21

5.3 Les essais à échelle réduite, pourquoi ?

- . notions de théorie de la similitude
- . applications dans le secteur ferroviaire
- . applications dans le secteur naval
- . applications dans le secteur aéronautique

6. Etudes de cas industrielles

I. Cours encadré en auto apprentissage (16h)

1. Introduction-Généralités (1h)

Pré-requis : aucun

Objectifs / Capacités : Appréhender le contexte de la collision dans les véhicules de transport. Faire la distinction entre sécurités active et passive, sécurités primaire et secondaire. Construire, pas à pas, un schéma directeur d'amélioration de la sécurité passive en quatre points : accidentologie, biomécanique du choc, sécurité primaire (structure) et sécurité secondaire (systèmes de retenue et indicateurs de risque lésionnel).

2. Accidentologie (1h)

Pré-requis : Mécanique générale.

Objectifs / Capacités : Appréhender les objectifs de l'accidentologie par le recueil de données sur le terrain et le suivi médical des accidentés. Connaître les principaux outils permettant d'évaluer les conditions d'un accident de la circulation en vue d'une reconstruction ultérieure en laboratoire.

3. Les outils de la sécurité primaire (1h)

- . **Grands principes dans le domaine automobile, ferroviaire et aéronautique**
- . **Utilisation du schéma directeur de conception au choc**

Pré-requis : aucun

Objectifs / Capacités : Appréhender le dimensionnement des structures soumises à la collision et la chronologie du choc dans les domaines automobile, ferroviaire et aéronautique. Introduire les outils de dimensionnement et de vérification.

4. Les outils de la sécurité primaire (1h)

- . **Outils de simulation en approche globale**
 - **Rappel de la dynamique des systèmes multicorps rigides**

Pré-requis : Mécanique rationnelle. Analyse des systèmes mécaniques poly-articulés.

Objectifs / Capacités : Organisation logicielle d'un code multicorps rigides (équations de la dynamique, équations de contrainte de liaison, paramétrage et description, résolution du système algébro-différentiel).

5. Les outils de la sécurité primaire (1h)

- . **Outils de simulation en approche globale**
 - **Outils analytiques de caractérisation des liaisons déformables**

Pré-requis : Mécanique des milieux continus. Théorie des plaques. Flambement.

Objectifs / Capacités : Rappel de la théorie du flambement local élastoplastique. Introduction aux modèles cinématiques en compression axiale et en flexion pure. Application de l'analyse limite pour caractériser l'effondrement des corps creux.

6. Les outils de la sécurité primaire (1h)

- . **Outils de simulation en approche globale**
 - **Outils de localisation spatiale des liaisons déformables**

Pré-requis : Cours 4. et 5.

Objectifs / Capacités : Comment positionner, orienter et rationaliser les liaisons déformables en compression et en flexion dans un modèle multicorps spatial.

7. Les outils de la sécurité primaire (1h)

. Outils de simulation en approche locale (MEF non-linéaire)

➤ Rappel de la MEF non-linéaire en dynamique rapide

Pré-requis : Méthode des Eléments Finis. Plasticité. Analyse numérique.

Objectifs / Capacités : Organisation logicielle d'un code de calcul par éléments finis explicite (EF usuels en crash, conditions initiales et aux limites dans les problèmes de crash, schéma d'intégration, modes à énergie nulle, gestion du contact, etc.).

8. Les outils de la sécurité primaire (1h)

. Outils de simulation en approche locale (MEF non-linéaire)

➤ Représentation des non-linéarités matérielles

Pré-requis : Plasticité. Visco-plasticité. **Endommagement et rupture ductile.** Comportement des matériaux. **Optimisation par méthode inverse.**

Objectifs / Capacités : Modèles de comportement matériel usuels en crash. Comment choisir un modèle de comportement. Comment identifier les paramètres matériels intrinsèques.

9. Les outils de la sécurité primaire (1h)

. Outils de simulation en approche locale (MEF non-linéaire)

➤ Représentation des non-linéarités géométriques

Pré-requis : Notions de procédés d'assemblages rivetés et soudés par points.

Objectifs / Capacités : Etude du comportement non-linéaire local et rupture des zones assemblées. Comment représenter les zones d'assemblage dans un modèle EF de structure. Comment alimenter un modèle de rupture macroscopique.

10. Les outils de la sécurité primaire (1h)

. Outils de simulation en approche locale (MEF non-linéaire)

➤ Organigramme de la mise en forme d'un problème de crash

Pré-requis : Cours 7. à 9.

Objectifs / Capacités : **Spécificités, conseils et mise en garde pour la mise en forme et l'exploitation d'un problème de crash.**

11. Les outils de la sécurité secondaire (1h)

. Grands principes dans le domaine automobile

. Critères biomécaniques de blessure et de tolérance humaine au choc

Pré-requis : Notions d'anatomie humaine.

Objectifs / Capacités : Appréhender la cinématique des passagers au cours du choc et l'efficacité des systèmes de retenue au travers de l'utilisation de mannequins substitués de l'être humain. Introduire les critères biomécaniques de vérification de la tolérance des principaux segments anatomiques à risque.

12. Les outils de la sécurité secondaire (1h)

. Composants participants à la sécurité secondaire

Pré-requis : Notions de systèmes de retenue.

Objectifs / Capacités : Décrire la fonction sécurité de l'ensemble des systèmes de retenue modernes et composants de l'environnement proche des passagers intégrés dans un véhicule automobile.

13. Les outils de la sécurité secondaire (1h)

. Outils de simulation du choc secondaire

Pré-requis : Méthode des éléments finis. Modèles multicorps.

Objectifs / Capacités : Quels mannequins choisir (multicorps/ EF/ anatomique, anthropométrie, etc.) et comment les positionner dans l'habitacle passagers. Comment sont modélisés les systèmes de retenue et l'environnement proche des passagers.

14. Les outils de la sécurité secondaire (1h)

. Organigramme de la mise en forme d'un problème de safety

Pré-requis : Cours 11. à 13.

Objectifs / Capacités : Spécificités, conseils et mise en garde pour la mise en forme et l'exploitation d'un problème de « safety ».

15. Tests et procédures d'essais sur structures, composants et éprouvettes (2h)

Pré-requis : Notions sur les moyens d'essais et de caractérisation des matériaux.

Objectifs / Capacités : Décrire les moyens d'essais et de mesures existants pour caractériser les propriétés matérielles et pour qualifier/valider une structure ou un composant de structure soumis au choc. Introduire les procédures d'essais normatives sur structures et composants dans le domaine automobile.

II. Travaux Dirigés et Travaux Pratiques Numériques (16h)

1. Accidentologie (1h)

Requis nécessaires : Outils numériques de reconstitution d'accidents (PC-CRASH, etc.).

Application : Mise en situation d'un accident de la circulation avec mise à disposition du recueil de données accidentologique. Retrouver les conditions de l'accident et estimer l'EES (Energy Equivalent Speed).

2. Approche globale – Outils analytiques compression/flexion (1h)

Requis nécessaires : Logiciel SEP-CRASH

Application : Caractériser la réponse d'effondrement en compression axiale et en flexion pure de différents profilés prismatiques à parois minces à l'aide du logiciel SEP-CRASH (Super Élément de Pliage) développé par le LAMIH/UVHC (certaines courbes de réponse serviront à la suite).

3. Approche globale – Modèles multicorps rigides 2D (2*2h)

Requis nécessaires : code multicorps 2D MB-CRASH

Application : Prise en main du code multicorps 2D MB-CRASH. Etude du comportement en collision de longerons automobiles simplifiés de type poutre en « S » à parois minces. Quantifier l'énergie dissipée durant le choc en compression et en flexion. Commenter le pic de décélération en rapport avec la tolérance humaine.

4. Approche locale – Méthode des éléments finis (1*2h)

Requis nécessaires : code EF explicite (PAM-CRASH, RADIOSS, LS-DYNA, ABAQUS/Explicite).

Application : Prise en main du code de calcul EF. Etude de l'influence de la discrétisation du problème continu, du comportement matériel et des interfaces de contact appliqués à l'impact d'une balle contre un tamis.

5. Approche locale – Méthode des éléments finis (2*2h)

Requis nécessaires : code EF explicite (PAM-CRASH, RADIOSS, LS-DYNA, ABAQUS/Explicite).

Application : Etude du comportement en collision de longerons automobiles simplifiés de type poutre en « S » à parois minces. Quantifier l'énergie dissipée durant le choc en compression et en flexion. Commenter le pic de décélération en rapport avec la tolérance humaine. Comparaison avec la solution multicorps rigides de MB-CRASH. Analyser le comportement local dans les zones fortement déformées en termes de déformations plastiques.

6. Sécurité secondaire – Méthode des éléments finis (2*2h)

Requis nécessaires : code EF explicite dédié au SAFETY (PAM-SAFE, RADIOSS, LS-DYNA).

Application : Prise en main du code de calcul EF. Modélisation de l'accident du TD1 La loi de décélération du véhicule est donnée, ainsi que les lois d'intrusion volant, planche de bord et les caractéristiques des systèmes de retenue. Reconstituer numériquement cet accident et évaluer les risques lésionnels par segments anatomiques. Comparer la prédiction avec les données accidentologiques.

III. Etude de Cas Industriel (3 sites * 4 étudiants * 16h)

Etude du comportement au choc symétrique d'une cabine de conduite ferroviaire destinée à limiter les risques encourus par le mécanicien conducteur. Ce cas industriel est issu d'une étude menée par l'ERRI (European Railway Research institute) au début des années 90.

L'objectif de cette étude de cas est de mettre en pratique le schéma directeur de conception au choc proposé durant le cours au travers la modélisation Multicorps Rigides, la modélisation hybride EF / Multicorps Rigides et la modélisation EF seule.

Les déformations plastiques étant essentiellement confinées sur le châssis de la cabine, l'étude se limite à un problème à deux dimensions pour cette partie de la structure.

Pour chacun des trois sites, il est demandé de modéliser le châssis, selon deux niveaux de discrétisation, à partir des dessins d'ensemble et de définition fournis et de mettre en forme le problème de crash (conditions initiales et aux limites).

1. Site 1 : Modélisation Multicorps Rigides (4 étudiants * 16h)

Bâtir un modèle multicorps rigides sur MB-CRASH en rationalisant le nombre et la position des liaisons déformables (rotules plastiques). Simuler l'essai de collision et extraire la réponse globale effort d'impact / déplacement de l'extrémité arrière du châssis. Renouveler l'opération en affinant la discrétisation selon un facteur deux. Commenter les résultats.

2. Site 2 : Modélisation Hybride EF/ Multicorps Rigides (4 étudiants * 16h)

Bâtir un modèle hybride éléments finis coques / multicorps rigides. Les longerons frontaux et arrières sont considérés comme sujets à modification dans le processus de dimensionnement et seront modélisés comme un assemblage de corps rigides. Il s'agit donc de rationaliser le nombre et la position des liaisons déformables (échange de données avec le site 1). Simuler l'essai de collision et extraire la réponse globale effort d'impact / déplacement de l'extrémité arrière du châssis. Renouveler l'opération en affinant la discrétisation des longerons selon un facteur deux. Commenter les résultats.

3. Site 3 : Modélisation EF (4 étudiants * 16h)

Bâtir un modèle éléments finis coques avec la même discrétisation que celle du site 2 (échange de données). Simuler l'essai de collision et extraire la réponse globale effort d'impact / déplacement de l'extrémité arrière du châssis, ainsi que les réponses locales en termes de déformations plastiques dans les zones fortement déformées. Renouveler l'opération en affinant la discrétisation du châssis selon un facteur deux. Commenter les résultats globaux et locaux.

4. Synthèse des 3 Sites

Comparer et commenter l'ensemble des résultats issus des trois niveaux de modélisation et des deux niveaux de discrétisation.

MODE D'EVALUATION et de VALIDATION DU MODULE

- 1. QCM pour évaluation des connaissances acquises et/ou notation**
- 2. Questionnaire d'Evaluation du cours et de suggestions d'amélioration, par les étudiants, les élèves et les enseignants extérieurs (à retourner à l'UVHC)**
- 3. Notation des TP Numériques**
- 4. Notation de l'Etude de Cas (comme pour un Projet)**
- 5. Examen final de contrôle des connaissances acquises (Partiel de 2h avec des questions d'ordre général sur les différents chapitres du cours et une étude de cas partiellement détaillée qu'il s'agira de compléter et de commenter les résultats)**