

**FORMATION MAPDL  
MODULE A2****ANSYS MAPDL NON-LINÉARITÉS****PUBLIC VISÉ**

Cette formation s'adresse à des ingénieurs et techniciens.

**PRÉREQUIS**

La connaissance des bases théoriques de la mécanique des solides et de la méthode des éléments finis, ainsi qu'une première expérience de l'utilisation du logiciel Ansys dans l'environnement Ansys Mechanical APDL (Classic) sont requises.

**OBJECTIFS  
PÉDAGOGIQUES**

À l'issue de la formation, le stagiaire sera capable de :

- Comprendre la technologie sous-jacente et maîtriser les algorithmes de solution utilisés pour mettre en œuvre des solutions non linéaires dans Ansys Mechanical,
- Décrire les trois types de non-linéarités dans Ansys Mechanical : géométrique, contact (changement de statut) et matériaux,
- Mettre en œuvre de manière approfondie la non-linéarités de contact,
- Comprendre les formulations élémentaires disponibles et quand les employer,
- Mettre en œuvre les lois matériaux non-linéaires d'Ansys : plasticité, fluage, hyper-élasticité, visco-élasticité, visco-plasticité...,
- Réaliser des calculs de flambage non linéaire,
- Reconnaître et corriger les causes les plus courantes de non-convergence dans les solutions non linéaires,
- Apprécier l'importance de la validation du modèle et plusieurs techniques qui peuvent être utilisées pour y parvenir.

**MOYENS  
PÉDAGOGIQUES  
ET TECHNIQUES**

La formation se déroule dans une salle dédiée équipée d'un écran, un vidéoprojecteur, des stations de travail et des écrans pour chacun des stagiaires. Celle-ci sera donnée en Français, sur la base de supports de cours en Anglais. Le cours comporte des séances de travaux pratiques sur station de travail. Les documents relatifs à la formation (cours et exercices) sont fournis sur clé USB.

**MODALITÉS  
D'ÉVALUATION**

En cours de formation par des exercices pratiques individuels sur le logiciel et à la fin de la formation par le biais d'un questionnaire.

**SANCTION**

Une attestation de formation sera remise à la fin de la formation.

**DURÉE**

**5 jours, soit 35 heures**

## CONTENU

### 1 - GÉNÉRALITÉS

#### 1.1 - Définitions

- Classification des différents types de non-linéarité
- Non-linéarité géométrique
- Non-linéarité de comportement des matériaux
- Élément non linéaire
- Systèmes conservatif et non-conservatif

#### 1.2 - Algorithmes de résolution

- Découpage d'un chargement en load-steps et substeps
- Utilisation de tables
- Rôle des itérations d'équilibre
- Résolution non linéaire par la méthode de Newton-Raphson
- Différentes variantes : raideur initiale, méthode de Newton-Raphson modifiée
- Critère et norme de convergence
- Condition de convergence
- Notion de rayon de convergence
- Difficultés de convergence - classification des causes de divergence
- Outils algorithmiques d'amélioration de la convergence
- Méthode de « descente adaptative »
- Technique du « line-search »
- Méthode de stabilisation
- Procédure d'incrémentation automatique de la charge
- Utilisation des prédicteurs
- Procédure automatique « solcontrol »

### 2 - NON-LINÉARITÉ DE CONTACT

#### 2.1 - Les éléments de contact de type "gap" (contact nœud à nœud)

- Principe de fonctionnement
- Critères de choix des raideurs
- Prise en compte du frottement
- Éléments CONTAC12, CONTAC52, CONTAC178
- Génération automatique des éléments
- Précautions d'emploi et limitations intrinsèques à ces éléments
- Que faire en cas de difficulté de convergence
- Contrôle des résultats et post-traitements spécifiques

#### 2.2 - Éléments de contact

- Élément de contact nœud-surface (CONTAC175)
- Élément de contact entre surfaces (TARGET169, 170, 171, CONTA172, 173, 174)
- Élément de contact entre lignes (CONTAC176)
- Élément de contact entre lignes et surfaces (CONTA177)
- Description des différentes formulations théoriques des éléments
- Formulation par pénalisation
- Formulation par pénalisation et multiplicateurs de Lagrange
- Importance et choix de la raideur de contact et des tolérances de pénétration
- Formulation lagrangienne pure

- Formulation par MPCs pour connexion automatique des maillages
- Régionalisation de l'espace et algorithme « pinball »
- Contact Manager et Contact Wizard
- Génération automatique des éléments de contact
- Principe de la génération manuelle
- Traitement spécifique des plaques et poutres (offsets)
- Techniques d'ajustement préalable des maillages
- Traitement des surfaces rigides, notion de nœud pilote, imposition d'une cinématique
- Prise en compte du frottement
- Formulation symétrique et non symétrique du contact : principe, intérêt, limite et choix
- Traitement des interférences et gaps initiaux
- Conduite des calculs, outils algorithmiques
- Débogage des modèles
- Contrôle des résultats et post-traitements spécifiques

### 2.3 - Aperçu sur la prise en compte des conditions de contact en thermomécanique couplée

### 2.4 - Examen de cas usuels

- Modélisation des assemblages boulonnés
- Modélisation du frettage
- Impact entre corps déformables

## 3 - ÉLÉMENT NON-LINÉAIRE

### 3.1 - Bibliothèque d'éléments

- Élément combinaison (COMBIN40)
- Élément COMBIN14 (en tant que dash-pot non linéaire)
- Élément de ressort non linéaire (COMBIN39)
- Élément rotule (COMBIN7)
- Élément de contrôle (COMBIN37)
- Élément de pré-tension (PRETS179)
- Élément de liaison pour la cinématique (MPC184)

### 3.2 - Modélisation des systèmes absorbeurs d'énergie

- Principe d'assemblage en série et/ou parallèle d'éléments non linéaires
- Obtention de lois rhéologiques particulières

### 3.3 - Option de vie et mort ("birth and death") des éléments

- Mise en œuvre
- Application à la modélisation du soudage
- Application aux constructions par phases en génie civil

### 3.4 - Modélisation des assemblages boulonnés

- Principe
- Élément PRETS179
- Mise en œuvre

## 4 - NON-LINÉARITÉ GÉOMÉTRIQUE

### 4.1 - Classification des types de non-linéarité géométrique

- Principales définitions
- Stress stiffening
- Grands déplacements
- Grandes rotations
- Grandes déformations

#### 4.2 - Classification des instabilités élastiques et aspects phénoménologiques

- Terminologie et classification de la résistance des matériaux
- Flambage
- Voilement
- Cloquage
- Déversement

#### 4.3 - Phénoménologie

- Bifurcation
- Post-flambage
- Snap-through
- Importance des imperfections géométriques
- Rôle et importance des non-linéarités de matériaux

#### 4.4 - Description matérielle et spatiale du mouvement

- Description de la cinématique d'un corps solide déformable
- Tenseur gradient de la déformation
- Décomposition polaire
- Différentes mesures de la déformation : Green-Lagrange, Cauchy-Green, Hencky, Almansi
- Différentes mesures des contraintes : Cauchy, Piola-Kirchoff
- Conséquences pratiques
- Descriptions lagrangienne totale, actualisée et augmentée

#### 4.5 - Traitement du stress-stiffening

- Intérêt et domaine de validité
- Forme de la matrice des contraintes initiales
- Processus itératif de calcul
- Validation des résultats

#### 4.6 - Grands déplacements et grandes déformations

- Stratégie de modélisation
- Chargements suiveurs et non suiveurs
- Comparaison des différents éléments coques (SHELL63, 181, 281, SOLSH190)
- Éléments câbles (LINK10) et membranes (SHELL41)
- Processus itératif et incrémental de calcul
- Technique du « line search »
- Critères de convergence
- Détection d'une instabilité physique (flambage)
- Instabilité numérique
- Validation des résultats

#### 4.7 - Instabilité élastique

- Flambement eulérien sur géométrie initiale
- Flambement eulérien sur géométrie déplacée
- Flambement en grands déplacements
- Pilotage en déplacement
- Pilotage en force avec stabilisation par ressorts
- Pilotage par la méthode de la longueur d'arc (Riks-Wempner)
- Stabilisation par calcul pseudo-dynamique
- Prise en compte des imperfections géométriques
- Critères de choix des éléments et de la finesse de maillage
- Analyse de cas tests classiques

## 5 - NON-LINÉARITÉ DES MATÉRIAUX

### 5.1 - Lois de comportement disponibles dans Ansys

- Élasticité non linéaire
- Hyper-élasticité (élastomères)
  - \* Loi polynomiale
  - \* Loi de Mooney-Rivlin
  - \* Loi de Blatz-Ko
  - \* Loi d'Ogden
  - \* Loi d'Arruda-Boyce
- Plasticité
  - \* Critère de plasticité
  - \* Critère de von Mises
  - \* Critère orthotrope de Hill
  - \* Critère de Drücker-Prager
  - \* Critère avancée pour les sols (cap-models)
  - \* Lois d'écoulement de Prandtl-Reuss
  - \* Différents modes d'érouissage (isotrope, cinématique, mixte)
  - \* Érouissage complexe et loi de Chaboche
  - \* Loi pour la fonte grise
  - \* Alliage à mémoire de forme
  - \* Importation d'un champ de contraintes initiales
- Modèles de béton et béton armé
  - \* Plasticité
  - \* Fissuration
  - \* Transfert de cisaillement dans les fissures
  - \* Écrasement en compression
- Viscoélasticité
  - \* Aperçu sur les modèles physiques proposés
  - \* Chaînes de Maxwell et loi de Prony
  - \* Curve-fitting à partir d'essai de relaxation
  - \* Effet de la température
  - \* Domaine de validité
  - \* Conduite des calculs
  - \* Post-traitements spécifiques
- Viscoplasticité
  - \* Modèle d'Anand et de Perzyna
  - \* Types de problème : sensibilité à la vitesse de déformation, approche couplée du fluage
- Fluage
  - \* Fluage primaire, secondaire et tertiaire
  - \* Algorithmes d'intégration temporelle en schéma explicite et implicite
  - \* Lois de fluage disponibles en standard
  - \* Détermination des paramètres du matériau par curve-fitting à partir de résultats d'essai
  - \* Introduction d'un modèle utilisateur
  - \* Post-traitements spécifiques
- Gonflement sous irradiation (swelling) - Nature du phénomène et traitement numérique

### 5.2 - Algorithmes de calcul

- Stratégie de conduite des calculs
- Critères de convergence
- Post-traitements spécifiques dans POST1 et POST26
- Examen critique des résultats obtenus et critères de validation