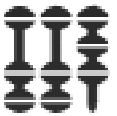


**La simulation numérique par la  
méthode des éléments finis avec  
 **ABAQUS**: un outil simple et  
ouvert pour l'analyse de  
problèmes de thermo-mécanique**

EMAC - Mars 2003

L. PENAZZI, F. NAZARET, V. VELAY

# Avant-propos

**La simulation numérique par la méthode des Éléments finis avec ABAQUS : un outil simple et ouvert pour l'analyse de problèmes de thermo-mécanique**

## **L'analyse de problèmes de thermo-mécanique**

**Dans quel cas faire de la simulation numérique ?**

**Pourquoi choisir la méthode des Éléments ?**

## **Pourquoi le choix d'ABAQUS ?**

**Une société qui développe ses propres outils et réalise des études**

**Une expérience reconnue du calcul par Éléments finis**

**Des logiciels largement utilisés dans les laboratoires et l'industrie**

**Un fonctionnement multi-plateforme assure sa pérennité**

## **Simplicité de la mise en œuvre**

**3 étapes pour la mise en œuvre d'un modèle**

**Intégrées dans un même environnement de travail graphique et interactif**

**Avec des accès directs au fichier de données**

## **Exemples de l'ouverture**

**Un large choix de domaines d'application**

**Une grande librairie de modèles standard**

**Complète par des modèles utilisateurs**

**Pour un fonctionnement "l'EMAC sous Unix"**

# Plan

## 1 - Introduction

- ¥ Les objectifs de la formation
- ¥ Le calendrier des séances
- ¥ Le programme
- ¥ Dans quel cas faire de la simulation numérique ?

## 2 - L'analyse de problèmes de thermo-mécanique

## 3- Pourquoi le choix d'ABAQUS ?

## 4- Simplicité de la mise en œuvre

## PAUSE

## 5 - Exemples de l'ouverture

## 6 - Etude d'un modèle avec ABAQUS CAE<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> CAE : Computer Aided Engineering

# Les objectifs

Pr senter les possibilit s des logiciels ABAQUS en analyse thermo-m canique de s solides et des structures

Prendre en main ABAQUS° travers un exemple de mod le m canique lin aire statiqu e

D couvrir les liens CAO-Calcul

# Le calendrier des sances

**Sance 1- Possibilit s des logiciels de calcul par lments finis ABAQUS en analyse thermom c anique**

Vendredi 7/3 9h00-12h00 Salle 1A24

**Sance 2 - Mise en oeuvre d'un calcul lin aire avec la version d'ABAQUS 6.2**

Vendredi 14/3 9h00-12h00 Salle 0A32

**Sance 3 - Interface CAO-Calcul avec un mod le de calcul construit sous IDEAS**

Vendredi 21/3 14h00-16h30 Salle 0F5

# L'analyse de problèmes de thermo-mécanique

## 1 - Introduction

## 2 - L'analyse de problèmes de thermo-mécanique

¥ Dans quel cas faire de la simulation numérique ?

¥ Pourquoi choisir la méthode des éléments finis ?

## 3- Pourquoi le choix d'ABAQUS ?

## 4- Simplicité de la mise en œuvre

**PAUSE**

## 5 - Exemples de l'ouverture

## 6 - Etude d'un modèle avec ABAQUS CAE <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> CAE : Computer Aided Engineering

# Dans quel cas faire de la simulation numérique ?

## Evaluer un concept

- Géométrie, physique, É

## Analyser une conception

- Pièce, ensemble

## Modéliser un comportement de matériau

- Élastique, plastique
- Linéaire, non linéaire

## Prévoir la réponse d'un modèle

- Extrapoler les résultats
- Changer d'échelle

## Simuler numériquement une opération ou un procédé

- Comprendre les phénomènes et leur effet
- Concevoir une opération

# Pourquoi choisir la méthode des éléments finis ?

## Les équations de la mécanique s'écrivent sous une forme intégrale sur le domaine

- Equations d'équilibre locale + conditions aux limites + loi de comportement
- Equivalent au principe des travaux virtuels

## La discrétisation des domaines en sous-domaines (nœuds, éléments)

- Conduit à la décomposition des formes intégrales
- Autorise la mise en place d'une approximation "Approximation par éléments finis"

## Permet l'écriture d'un système d'équations : $\{F\} = [K] \{U\}$

- Faisant apparaître :
  - ¥ les inconnues du problème : les déplacements aux nœuds  $\{U\}$
  - ¥ les données :
    - propriétés géométriques et matériaux des éléments  $[K]$
    - efforts externes aux nœuds  $\{F\}$
- "Facilement" résoluble par des méthodes numériques, type "méthode de gauss "



# Pourquoi choisir la méthode des éléments finis ? (fin)

**D marche équivalente pour les problèmes de thermique dans les solides**

## **Prise en compte de la température**

- Dans les lois de comportement

## **Prise en compte de production chaleur**

- Dissipation du comportement anélastique dans les domaines
- Dissipation du frottement aux interfaces

## **Permet l'écriture d'un système d'équations : $\{\Phi\} = [C] \{T\}$**

- Faisant apparaître :
  - ¥ les inconnues du problème : les températures aux nœuds  $\{T\}$
  - ¥ les données :
    - propriétés géométriques et physiques des sous-domaines  $[C]$
    - flux externes aux nœuds  $\{\Phi\}$

## **Possibilités de résoudre le problème thermo-mécanique complet :**

- $\{\Phi\} = [C] \{T\}$
- $\{F\} = [K] \{U\}$

# Pourquoi le choix d'ABAQUS ?

## 1 - Introduction

## 2 - L'analyse de problèmes de thermo-mécanique

## 3- Pourquoi le choix d'ABAQUS ?

Une société qui développe ses propres outils et réalise des études

Une expérience reconnue du calcul par éléments finis dans l'industrie et les laboratoires

Des logiciels pour un large spectre d'utilisation

Un fonctionnement multi-plateforme assure sa pérennité

## 4- Simplicité de la mise en œuvre

## PAUSE

## 5- Exemples de l'ouverture

## 6 - Etude d'un modèle avec ABAQUS CAE <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> CAE : Computer Aided Engineering

# Une société qui développe ses propres outils et réalise des études

## ABAQUS, Inc

Créé en 1978 par D. Hibbit, B. Karlsson & P. Sorensen  
Pawtucket (USA-Rhode Island)



## Une représentation mondiale avec 30 sites et 350 personnes

Etat-Unis :

Europe : Allemagne, Autriche, Espagne, France, Grande-Bretagne, Italie, Pologne,

Suède

Afrique du Sud,

Australie, Corée, Japon, Taiwan

<http://www.abaqus.com>

## Une société qui développe ses propres outils et réalise des études (fin)

### **ABAQUS Software : Suites de logiciels d'analyse par la méthode des Éléments finis**

#### **Activité initiale pour le secteur nucléaire et pétrolier (~1980)**

- ¥ Défense + Automobile + Aéronautique + Génie Civil + Produits manufacturés (1980-1990)
- ¥ Evolution vers les problèmes de mécanique des structures non-linéaires

#### **Dans un but :**

- ¥ D'amélioration des produits et des procédés ,
- ¥ Réduction des temps de cycle de conception,
- ¥ Réduction ou suppression des essais réels.

# Des logiciels pour un large spectre d'utilisation

## La suite de logiciels proposés

### ¥ ABAQUS/Standard

Analyse générale de mécanique et thermique stationnaire ou transitoire par résolution implicite

### ¥ ABAQUS/Explicit

Analyse mécanique dynamique transitoire par résolution explicite

### ¥ ABAQUS/Aqua

Analyse avec calcul d'interaction fluide/structure

### ¥ ABAQUS CAE

Environnement de travail incluant pré, solveur et post

### ¥ ABAQUS/Viewer (remplace ABAQUS/Post en 5.X)

Post-processeur interactif pour les différentes analyses

### ¥ ABAQUS/ USA É

# Une expérience reconnue du calcul par éléments finis dans l'industrie et les laboratoires

## ¥ Boeing - BCA (USA)

75 % de la flotte mondiale

Analyse non-linéaire et effets d'endommagement de structures

Optimisation en conception de structures

Analyse en propagation de fissures sur panneau de fuselage pressurisé

Etude d'application de fabrication telle que l'analyse du formage de rivets

## ¥ CORUS (NL)

18 millions de tonnes d'acier en 2001

Simulation du système de laminage pour les produits longs

Optimisation du nombre de passages en laminage

## ¥ Honda (J)

Nouveau système de transmission continue - réduction des vibrations

Prévision de la réponse dynamique et des contraintes pour la durabilité du système

## ¥ Motorola iDEN (USA)

Smartphone portable

Simulation des essais de chute

Etude des structures à l'impact

# Une expérience reconnue du calcul par éléments finis dans l'industrie et les laboratoires (fin)

## Quelques exemples d'utilisation l'EMAC

- ¥ **Modélisation de l'écrouissage d'une paraison de verre (N. Feraud, 1997)**  
Etude de la mise en forme de verre pour la fabrication de bouteille
  - ¥ **Thermique des outils d'emboutissage (G. Yang, 1997)**  
Analyse des effets de l'écrouissage et du frottement sur l'échauffement des outils
  - ¥ **Comportement thermomécanique d'assemblages (M. Guillotin, 1999)**  
Etude d'assemblages céramiques multiblocs pour la mise en forme de superalliages
  - ¥ **Etude du faïencage d'un acier par fatigue thermique (S. Jean, 1999)**  
Modélisation de la réponse thermo-élastique d'une éprouvette de fatigue thermique
  - ¥ **Conception d'un outillage d'emboutissage (E. Mathey, 2001)**  
Dimensionnement d'un outillage d'emboutissage pour l'étude des effets d'usure
  - ¥ **Comportement de béton fractaire (D. Garriga-Majo, 2002)**  
Modélisation du comportement mécanique d'un béton fractaire renforcé
  - ¥ **Etude mécanique du contact tôle et rayon de matrice (D. Attaf, 2003)**  
Etude de la dégradation de rayons de matrice d'emboutissage
- É

# Un fonctionnement multi-plateforme assure sa p r nit

## Une vari t de syst mes d'exploitation et d e machines

Platform (click for System Rqmts)	Operating System	Supported Products						
		Standard <sup>a</sup>	Explicit	CAE <sup>b</sup>	Viewer <sup>b</sup>	ADAMS	C-MOLD	MOLDFLOW
<u>HP</u> Alpha	Tru64 UNIX 5.1	☑ ● ●	☑ ● ●		☑ ●	☑	☑	☑
<u>HP</u> PA8000	HP-UX 11.0	☑ ● ●	☑ ● ●	☑ <sup>c</sup>	☑	☑	☑	☑
<u>IBM</u>	AIX 4.3.3	☑ ● ●	☑ ● ●	☑	☑	☑	☑	☑
<u>IBM</u> <sup>d</sup>	AIX 5.1	☑ ● ●	☑ ● ●	☑	☑	☑	☑	☑
<u>Itanium</u> <sup>h</sup>	HP-UX 11.22	☑ ● ●	☑ ● ●				☑	☑
<u>Itanium</u> <sup>h</sup>	Linux Red Hat 7.2	☑ ● ●	☑ ● ●				☑	☑
<u>Pentium</u> <sup>h</sup>	Linux SuSe 7.3	☑ ●	☑ ●	☑	☑		☑	☑
<u>Pentium</u>	Windows 2000 <sup>e</sup>	☑ ●	☑ ● <sup>f</sup>	☑ <sup>c</sup>	☑	☑	☑	☑
<u>SGI</u> <sup>g</sup>	IRIX64 6.5	☑ ● ●	☑ ● ●	☑ <sup>c</sup>	☑	☑	☑	☑
<u>SUN</u>	Solaris 7	☑ ●	☑ ●	☑	☑	☑	☑	☑
<u>SUN</u> <sup>h</sup>	Solaris 8	☑ ● ●	☑ ● ●	☑	☑	☑	☑	☑
	<b>KEY</b>	☑	Product is available on platform.					
		●	Platform supports multi-CPU (parallel) processing.					
		●	Uses only 64-bit addressing; will not run on 32-bit systems.					



# Documentation

## 4 documentations d'auto-apprentissage

- ¥ Getting Started with ABAQUS/Standard: Interactive Version
- ¥ Getting Started with ABAQUS/Explicit: Interactive Version
- ¥ Getting Started with ABAQUS/Standard: Keywords Version
- ¥ Getting Started with ABAQUS Explicit: Keywords Version

## 3 manuels utilisateurs

- ¥ ABAQUS/Standard User's Manual
- ¥ ABAQUS/Explicit User's Manual
- ¥ ABAQUS/CAE User's Manual

## 2 manuels d'exemples

- ¥ ABAQUS Example Problems Manual (75 exemples documentés, fichiers données, résultats)
- ¥ ABAQUS Benchmarks Manual (200 cas)

# Simplicité de mise en œuvre

## 1 - Introduction

## 2 - L'analyse de problèmes de thermo-mécanique

## 3- Pourquoi le choix d'ABAQUS ?

## 4- Simplicité de la mise en œuvre

3 étapes pour réaliser un modèle et l'étudier

Intégrées dans un même environnement de travail graphique et interactif

Avec des accès directs au fichier de données

✧ Mise en données détaillée

— Vue générale

— Maillage

— Propriétés des matériaux (cas mécanique et thermique)

— Interaction extérieure et contact

— Conditions aux limites

— Etape d'analyse

✧ L'accès à une boîte à outils pour la résolution par éléments finis

## PAUSE

## 5 - Exemples de l'ouverture

## 6 - Etude d'un modèle avec ABAQUS CAE <sup>(1)</sup>

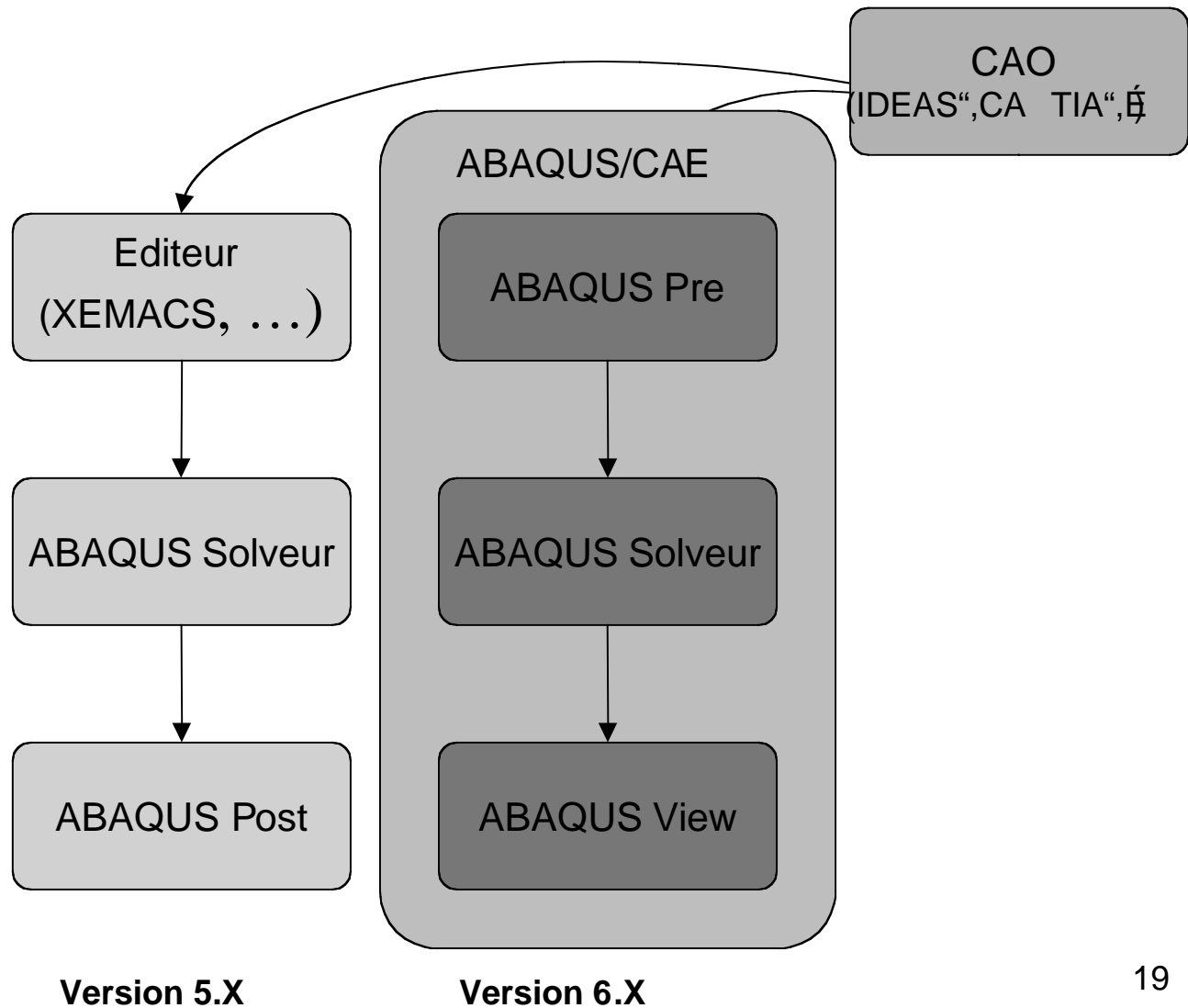
<sup>(1)</sup> CAE : Computer Aided Engineering

# 3 tapes pour r aliser un mod le et l' tudier

¥ Mise en donn es

¥ R solution du probl m e

¥ Analyse des r sultats



# Int gr es dans un environnement graphique interactif

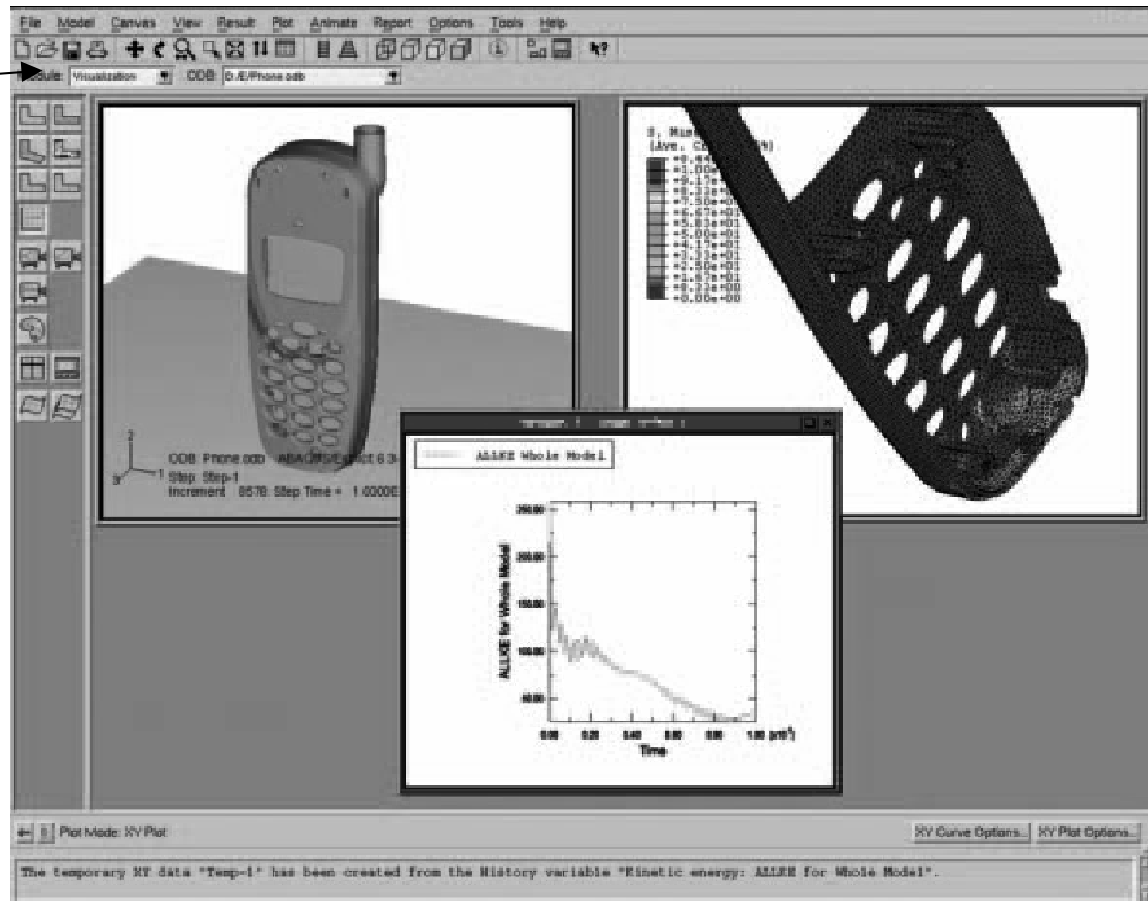
## Environnement commun

- ¥ Mise en donn es
  - Module Part
  - Module Property
  - Module Assembly
  - Module Step
  - Module Load
  - Module Mesh
  - Module Job
- ¥ Analyse des r sult ats

## Action en 3 "clic" par menu

- ¥ Menu 1
- ¥ Deroulement 2
- ¥ Fen tre sp cialis e 3

## Action directe par ic ne



ABAQUS doc

# Acc s direct au fichier de donn es

## Le fichier de donn es (toto.inp )

- ¥ Produit en sortie d'ABAQUS CAE
- ¥ Accessible et modifiable sous diteur (XEMACS)
  - Ajout de fonctionnalit s
  - Mise en place des mod le s utilisateurs
- ¥ Reprise des m t hodes de travail des versions 5.X

Commentaires

Mot-cl s

Argument

```
**
** MATERIALS
**
*Material, name=steel
*Elastic
209000., 0.3
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: fixe Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
*Boundary
_G6, ENCASTRE
** -----
**
** STEP: beamload
**
*Step, name=beamload
Load the top of the beam
*Static
1., 1., 1e-05, 1.
```

# Mise en données

## 5 phases classiques + 1 si CAE

- |   | Modèle de calcul |
|---|------------------|
| ¥ Géométrie (ABAQUS CAE seulement)  |                  |
| ¥ Maillage  |                  |
| ¥ Propriétés des matériaux  |                  |
| ¥ Interaction extérieure et contact   |                  |
| ¥ Conditions aux limites  |                  |
| ¥ Etapes d'analyse  |                  |
| — Mode d'analyse (mécanique statique, dynamique mode propre, thermique, thermo-mécanique, etc.) |                  |
| — Sollicitations (force, déplacement, etc.)   |                  |
| — Types de résultats  |                  |

# Mise en données (fin)

## L'accès à une boîte à outils pour la résolution par éléments finis

- ¥ Mise en données = préparation d'un modèle de calcul par éléments finis
  
- ¥ Paramétrage des différentes parties du modèle à partir de données
  - standards (disponibles)
  - de modèles utilisateurs
  
- ¥ Différents niveaux de besoin et d'utilisation
  - Initiation ou étude simple
    - ¥ 1 : **ABAQUS CAE**
  - Etude complexe :
    - ¥ 2 : **ABAQUS CAE** + modification directe dans fichier de données **toto.inp**
    - ¥ 3 : 2 + modèles utilisateurs ABAQUS (**umat**, **É** ou en post processeur (**uvarm**, **É**))
    - ¥ 4 : 2 + modèles utilisateurs d'éléments finis à partir de **Z-ABA (mode utilisateur)**
    - ¥ 5 : 2 + modèles utilisateurs d'éléments finis à partir de **Z-ABA (mode développeur)**

## Exemples d'ouverture ?

- 1 - Introduction
- 2 - L'analyse de problèmes de thermo-mécanique
- 3- Pourquoi le choix d'ABAQUS ?
- 4- Simplicité de la mise en œuvre

**PAUSE**

### 5 - Exemples de l'ouverture

Intégration de modèles utilisateurs

- 1- Modèle de comportement élastique endommageable d'un béton - umat (F. Nazaret)
- 2- Post-traitement des résultats - uvarm (F. Nazaret)
- 3- Utilisation d'un modèle de comportement visco-plastique - Z-ABA(V. Velay)
- 4- Détermination des conditions aux limites en thermique - Z-OPTIM (V. Velay)

Un large choix de domaines d'application

Pour un fonctionnement "EMAC sous Unix"

### 6 - Etude d'un modèle avec ABAQUS CAE<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> CAE : Computer Aided Engineering



# Un large choix de domaines d'application

## ABAQUS/Standard (r solution implicite)

- ¥ Analyses lin ai res ou non-lin aires
  - Analyse statique ou dynamique en contraintes et d placements
  - R ponse visco- lastique ou visco-plastique
  - Analyse de transfert thermique (transitoire et stationnaire)
  - Analyse de diffusion de masse (transitoire et stationnaire)
  - Analyse acoustique
  - Probl mes c oupl s
    - ¥ Thermo-m canique ave c couplage r ciproque
    - ¥ Thermo- lectrique
    - ¥ Piezo lec trique
    - ¥ M canique des milieux poreux satur s et no n-satur s, cou plage avec l'c oulement
    - ¥ Thermo-m canique ave c diffusion de masse
    - ¥ Couplage m can ique/acoustique
- ¥ Analyses lin ai res de perturbations
  - Analyse statique ou dynamique en contraintes et d pla cements (mode propre, flambage, É

## ABAQUS/Explicit (r solution explicite)

- Analyse dynamique en contrainte et d placem ent É

# Pour un fonctionnement l'EMAC sous Unix“

## Installation EMAC des licences ABAQUS

¥ Au 1/2/03 : licences jeton (4 k<sup>ans</sup>) :

- 5 ABAQUS 6.2 (ou ABAQUS 5.8) (licence 20 et 21)
- 2 ABAQUS Viewer en 6.2 ou ABAQUS Post en 5.8 (licence 22)
- 3 ABAQUS CAE (licence 24)

¥ Serveur de licence

- Machine : nation
- Programme : lmgr (permet l'utilisation h t rog ne 5.8 et 6.2)

¥ Utilisation

- Machine : toute station Unix“ dont versio n O.S.  $\geq 5.8$ . Si possible machine du CROMeP !

Nom	Type	O.S.	RAM (MO)	Nb.proc.	Freq (MHz)
ambroise	Ultra 5_10	5.8	4096	1	360
montrouge	Ultra 5_10	5.8	192	1	270
michel	Sun Blade 100	5.8	384	1	502
maillot	Sun Blade 100	5.8	384	1	502
massena	Ultra_1	5.9	128	1	167
mabillon	Sun-Fire-280R	5.9	4096	2	900
malesherbe	Sun Blade 100	5.9	384	1	502

# Pour un fonctionnement l'EMAC sous Unix“

## Acc s

- ¥ Chemin g n ral ( ajouter la variable d'environnement \$ path)
  - /usr/local/abaqus\_6.2/Commands/
- ¥ CAE :
  - abaqus cae
- ¥ Viewer :
  - abaqus view
- ¥ Solveur
  - abaqus job=XXX
- ¥ Documentation
  - abaqus doc

# Etude d'un modèle avec ABAQUS CAE

1 - Introduction

2 - L'analyse de problèmes de thermo-mécanique

3- Pourquoi le choix d'ABAQUS ?

4- Simplicité de la mise en œuvre

PAUSE

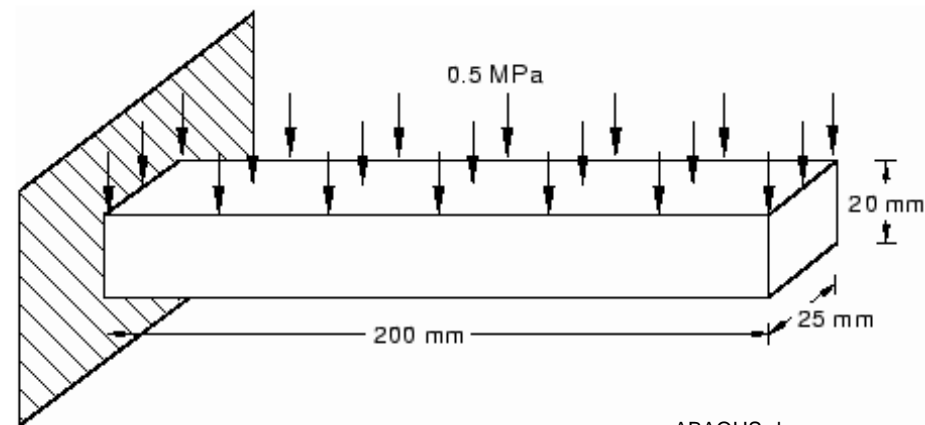
5 - Exemples de l'ouverture

6 - Etude d'un modèle avec ABAQUS CAE

Création d'un modèle avec ABAQUS CAE

Réalisation du calcul sous UNIX

L'analyse des résultats avec ABAQUS CAE



# Création d'un modèle avec ABAQUS CAE

## Les 7 tapes de la création É du modèle

### ¥ Géométrie (Module Part)

- Poutre (200x20x25 mm<sup>3</sup>) - beam

### ¥ Propriétés matérielles (Module Property)

- Material : Isotrope linéaire élastique  
E=209 10<sup>3</sup> MPa, ν=0.3 : steel

### ¥ Assemblage du modèle (Module Assembly)

- Assembly : beam

### ¥ Etape de calcul (Module Step)

- Step : Beamload, static, general,  
- Output : field output request

### ¥ Conditions aux limites et chargement (Module Load)

- BC : fixed initial (encastrement à l'origine)  
- Load : pressure 0,5 MPa

### ¥ Maillage (Module Mesh)

- Hexa - Analyse en contraintes - 10 mm de pas

### ¥ Préparation de la résolution (Module Job)

- Job = poutre-deform

CAE poutre

Le fichier de données **poutre-deform.inp** est prêt ! 29

# La réalisation du calcul sous UNIX

## Passage sous UNIX

¥ Connexion la machine locale ou sinon serveur si besoin (plus de rapidité)

¥ Lancement du calcul

— En interactif

```
abaqus job=poutre-deform interactive
```

— En tâche de fond

```
abaqus job=poutre-deform
```

# L'analyse des résultats avec ABAQUS CAE

## Retour dans ABAQUS CAE

### ¥ Visualisation des résultats (Module Visualisation)

- Sélection du fichier "odb" : poutre-deform.odb
- Affichage du maillage initial : plot > undeformed shape
- Affichage de la déformée : plot > deformed shape
- Affichage des contours : plot > contours (par défaut V. Mises)
- Affichage d'autres résultats : Result > field output (choix)

### ¥ Sortie d'un résultat graphique

- Sélection : File > Print > dans fichier (format PS) ou pour rapport (format EPS, PNG, TIFF, ...)

### ¥ Information d'une valeur locale

- Sélection : Tools > Query > Probe values et selon valeur nodale ou élémentaire sélection des informations à observer.

# Création d'un modèle avec ABAQUS CAE

## Conclusion

- ¥ Mise en données et visualisation des résultats avec ABAQUS CAE
  - Forme graphique et interactive
  - Peu de connaissances spécifiques aux méthodes de éléments finis
  - Presque aucune manipulation directe de commandes Unix“ ou de syntaxe ABAQUS“
  - Accessible tous
  
- ¥ Calcul thermo-mécanique faiblement complexe
  - Nécessite la maîtrise de la schématisation d'un problème et des équations physiques
  - Permet :
    - ¥ La modélisation du comportement des matériaux et sa validation (comparaison essais)
    - ¥ Le dimensionnement de montages d'essais
    - ¥ L'analyse critique des résultats d'essais





# Un outil simple et ouvert pour l'analyse de problèmes de thermo-mécanique

Nouvelle génération de programmes ABAQUS (6.X)

Accessibilité et interactivité avec ABAQUS CAE

- Intègre les différentes étapes de travail,
- Rend le recours des CAO externes,

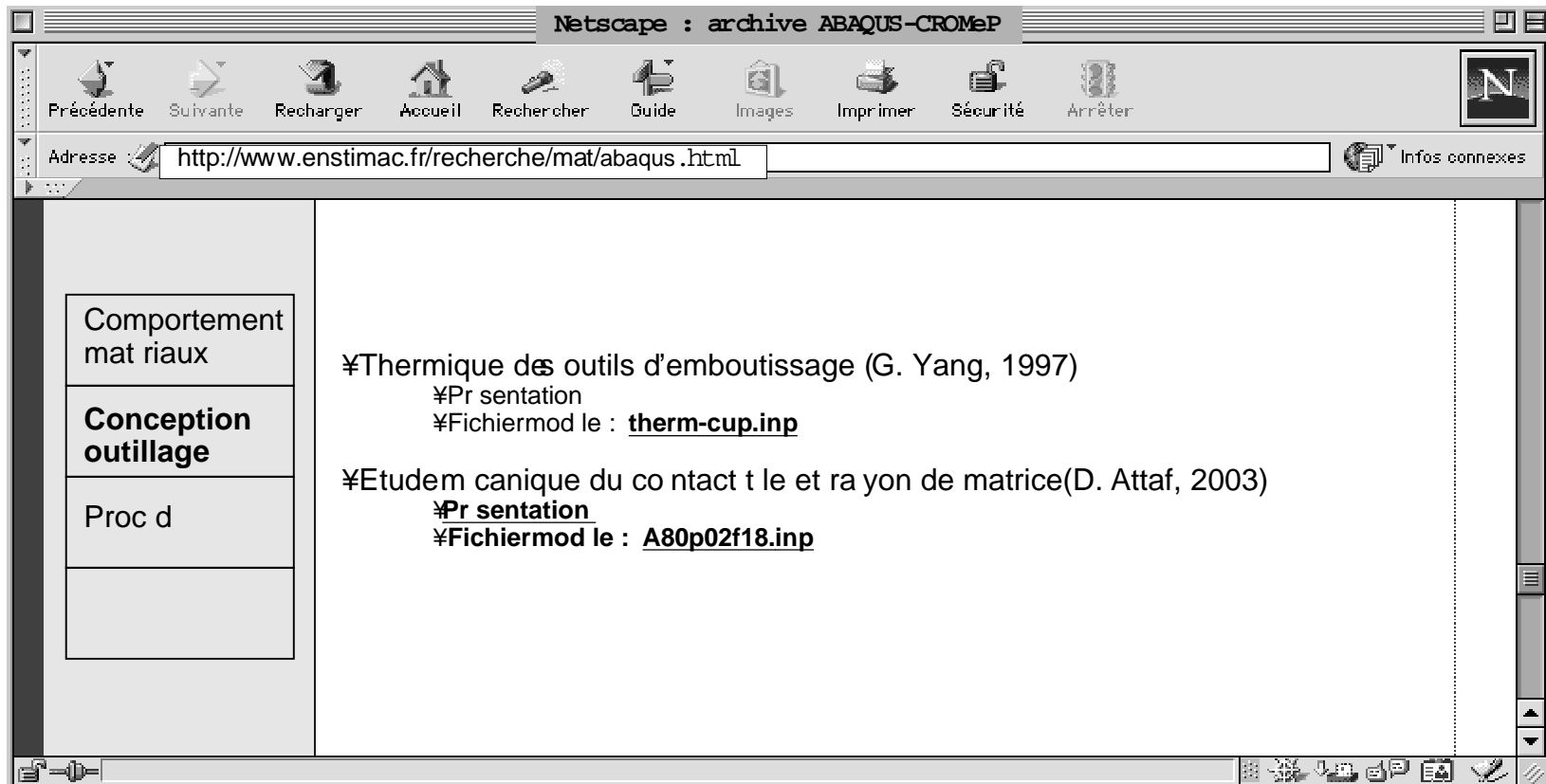
Nombreux comportements et analyses disponibles en standard,

Possibilités d'ajouter ses propres développements :

- Comportement,
- Frottement,
- Post-traitement,

Constitution d'un savoir-faire modélisation CROMeP durable et partageable !

Archivage des modèles, des fichiers et des exemples à télécharger



# Détails de l'analyse mécanique

## Procédures d'analyse mécanique

- ¥ Un même fichier de données peut inclure différentes procédures d'analyse
- ¥ Procédure d'analyse mécanique
- ¥ Analyse mécanique pure, couplée acoustique, couplée piézoélectrique
- ¥ Régime quasistatique, transitoire
- ¥ Basée sur la théorie des petites perturbations
- ¥ L'analyse dynamique intégrée :
  - + recherche des fréquences propres,
  - + analyse transitoire par superposition modale
  - + réponse spectrale,
  - + réponse harmonique, spectrale
- ¥ Mécanique non-linéaire
- ¥ Analyse non-linéaire en contraintes/déplacements statique, dynamique ou dynamique avec impacts
- ¥ Procédure particulière pour fluage (ou de relaxation), contrôle du chargement associé à la vitesse de déformation (superplasticité)
- ¥ Mécanique de la rupture
- ¥ Prise en compte des effets dus aux fissures
- ¥ Option pour le calcul de l'intégral J

## Annexe 2

### Proc dure d'analyse thermique

- ¥ Analyse thermique en diffusion pure ou convection/diffusion, lin aire ou non, r gime transitoire ou permanent
- ¥ Proc dure d'analyse thermo-m canique
- ¥ En g n ral fortement non-lin aire
- ¥ R solution si multan e des quations de la m canique (sans effet d'inertie) et des quations thermiques
- ¥ R solution en r gime permanent ou transitoire
- ¥ Prise en compte de l' chauffage (term e source dans l' quation de la chaleur) du :
  - + la dissipatio n plastique
  - + aux frottements
  - + aux changes th ermiques entre 2 surfaces

### Proc dure d'analyse des milieux poreu x

- ¥ R solution si multan e des quations de la m canique (sans effet d'inertie) et des quations d' coulement (loi de Darcy)
- ¥ R solution en r gime permanent ou transitoire

## Annexe 3

### Algorithmes

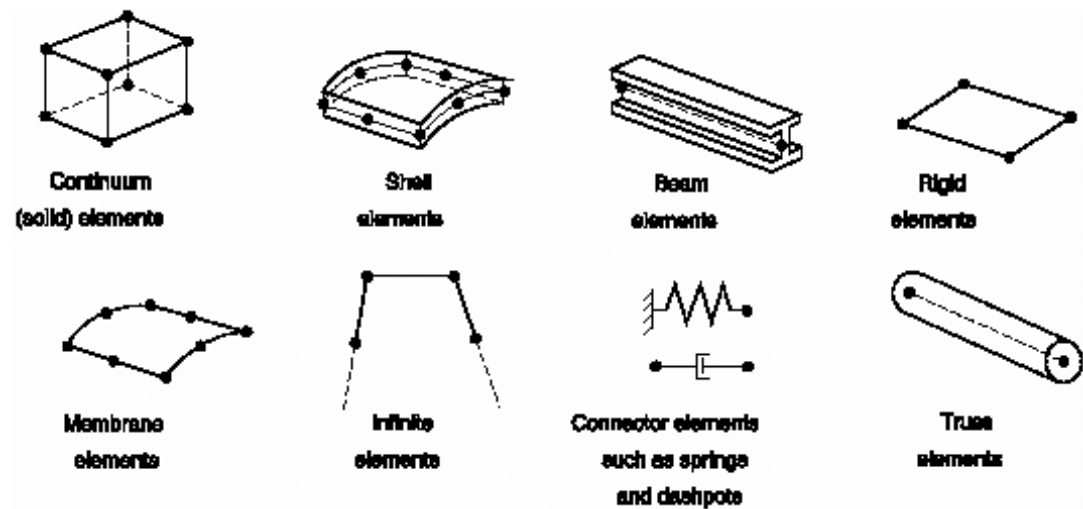
- ¥ Problème linéaire : solution obtenue directement
- ¥ Problème non-linéaire en régime permanent : solution obtenue avec itération (contrôle de la précision)
- ¥ Problème non-linéaire en régime transitoire : solution obtenue avec itération (contrôle de la précision) et incrémentation (contrôle du pas de temps)
  - + schéma d'intégration implicite Hilbert-Hughes-Taylor
- ¥ Techniques de résolution
- ¥ Non linéarités géométriques
- ¥ Formulation de Lagrange et de Lagrange actualisées (pb d'élasticité ou d'élasto-plasticité)
- ¥ Résolution d'équations non-linéaires
- ¥ Méthode de Newton complète (reconstruction de la matrice de rigidité chaque itération)
- ¥ Accélérateur de convergence pour des discontinuités servies
- ¥ Contrôle de la solution
- ¥ Contrôle en force, déplacement, température chaque pas
- ¥ Critère sur les résidus (minimum) associés chaque type d'équations

# Mise en oeuvre de la modélisation

## Maillage

- ¥ Description 1D, 2D (planes, axisymétrique, 3D)
- ¥ Bibliothèque d'éléments (~860 éléments standards)
  - Éléments de MMC<sup>(1)</sup>
    - ¥ 1D,
    - ¥ 2D (contraintes planes, déformations planes, axisymétrique),
    - ¥ 3D
  - li l'analyse effectuée (mécanique, thermique, thermomécanique, É)

- Structures particulières :
  - ¥ poutres (Euler-Bernoulli, É),
  - ¥ plaques (Love-Kirchhoff, É),
  - ¥ coques, É



- "Élément" ou contours rigides

¥ Élément utilisateur

(1) MMC : Mécanique des Milieux Continus

# Mise en données de taille (suite)

## Propriétés des matériaux (cas mécanique et thermique)

¥ Générales (masse volumique, coeff. dilatation thermique, Élastrope, orthotrope ou anisotrope)

¥ Comportement élastique et plastique

- Élastique : linéaire isotrope/orthotrope, anisotrope
- Hypoélastique : matériau dont les propriétés élastiques dépendent de la déformation
- Hyperélastique : matériau élastique compressible
- Viscoélastique : dépendance en série de Prony ou du module de relaxation
- Plastique :
  - ¥ critères : isotrope Von Mises, anisotrope Hill quadratique
  - ¥ écrouissage : isotrope, cinématique, Drucker-Prager, Cap
  - ¥ loi d'évolution point/point :  $\sigma$ ,  $\epsilon_p$ , (T)
  - ¥ Modèle utilisateur
- Endommagement couplé à la plasticité, É

¥ Propriétés thermiques

- capacité calorifique
- conductivité
- chaleur latente, chaleur spécifique
- facteur de conversion plastique

¥ Matériau utilisateur

# Mise en données d'analyse (suite)

## Interaction extérieure et contact

- ¥ Description tendue pour modélisation de l'interaction entre différents corps matériels se par des interfaces quand :
  - Les solides rentrent en contact
  - Présence de contraintes cinématiques
  - Présence de connexion avec l'extérieur
  - Echange de chaleur par radiation
- ¥ Analyse mécanique
  - Effet du cisaillement en surface due au frottement de contact
  - Modèles de frottement : Coulomb, modèle utilisateur
- ¥ Analyse thermique
  - Fonction d'échange par radiation, résistance thermique de contact entre deux surfaces.
  - Résistance thermique de contact (cartement des surfaces)
- ¥ °Modèle utilisateur



# Mise en donnes de taille (suite)

## Conditions aux limites

- ¥ Ponctuelle (imposée aux nœuds) :
  - déplacement,
  - rotation,
  - température,
  - force, É
- ¥ Surfaccque (imposée aux faces d'élément)
  - Pression,
  - Flux de convection,
  - Flux rayonnement,
- ¥ Volumique (imposée au volume)
  - gravité,
  - accélération,
- ¥ °Modèle utilisateur

# Mise en donnes de taille (suite)

## Etape d'analyse

- ¥ Mode d'analyse
  - statique (lin aire ou non-lin aire)
  - dynamique
  - thermo-m canique coupl e
  - É
  
- ¥ Sollicitations
  - Ponctuelle (d placements, rota tions, temp rature, ef forts)
  - Surfacique (pression, flux de rayonnement, flux de convection)
  - Volumique (gravit , acc l ration)
  
- ¥ Choix de r sultats
  - Valeur de champs :
    - ¥ aux nuds (d placements, rot ations, temp rature, efforts)
    - ¥ aux l ments (d formation, contra intes)
  
  - Valeur historique (aux nuds, aux l ments)

# Mise en données d taille (suite)

## Cr ation ou modification des fichiers de données (XXX. inp) avec XEMACS

### ¥ Fichier de données structur

- Mot-clefs : **\*Expression**, ...
- Param tres sp cifiant les o ptions
- Ecriture au format ASCII lisible sous diteur
- Pas de ligne "blanche"

### ¥ Quelques mot-clefs classiques

- **\*NODE** : D finition des n ŷuds du maillage
  - \*Node
    - 1, 100., 10., 0.
    - 2, 90., 10., 0.
- **\*ELEMENT** : D finition des l ments du maillage
  - \*Element, type=C3D8I
    - 1, 85, 86, 107, 106, 1, 2, 23, 22
    - 2, 86, 87, 108, 107, 2, 3, 24, 23

### ¥ Modification possible partir du fichier CAE mais pas l'inverse !

# Mise en donnes d taill e (suite)

## Cas de la poutre en flexion

25 mot-clefs pour d finir le mod le !

```
*Assembly, name=Assembly
*Boundary
*Dload
*El Print, freq=999999
*Elastic
*Element, type=C3D8I
*Elset, elset=__G7_S2, internal
*End Assembly
*End Instance
*End Part
*End Step
*Heading
*Instance, name=beam-1, part=beam
```

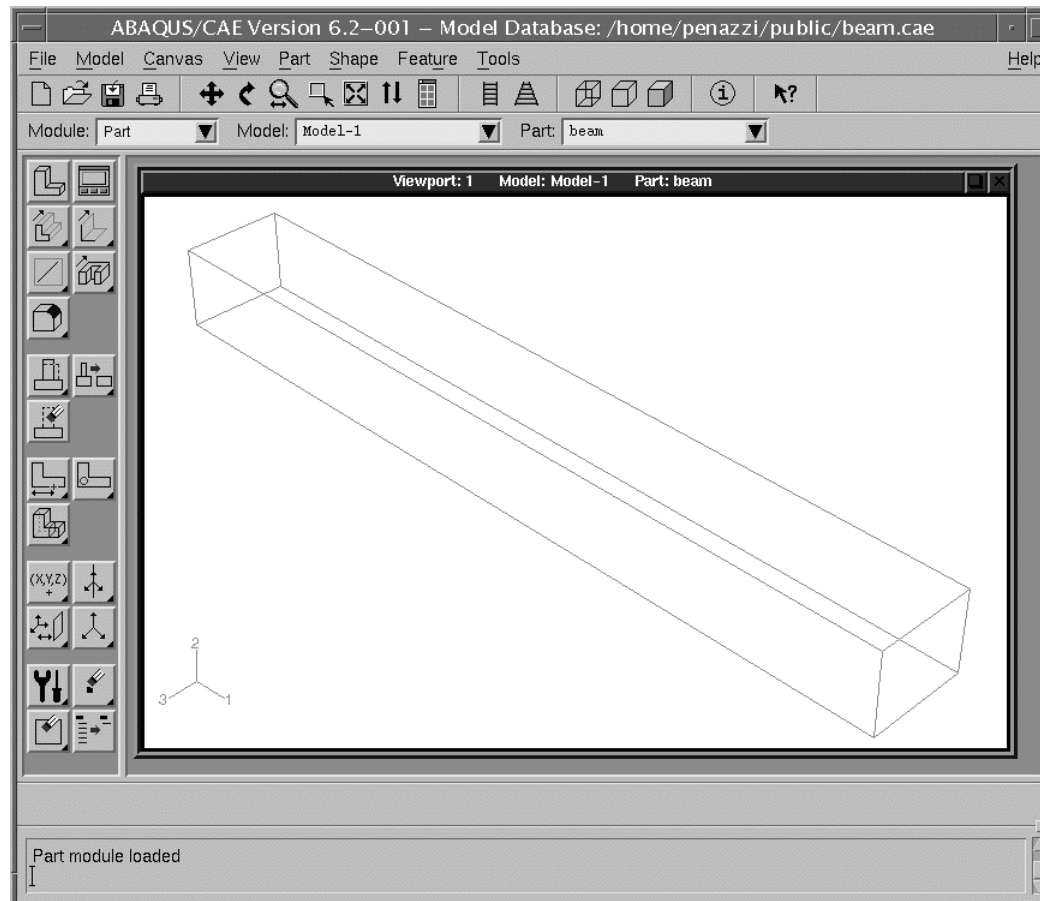
```
*Material, name=steel
*Node
*Node Print, freq=999999
*Nset, nset=_G6, internal, instance=beam-
1, generate
*Output, field, variable=PRESELECT
*Output, history, variable=PRESELECT
*Part, name=beam
*Restart, write, frequency=1
*Solid Section, elset=_I1, material=steel
*Static
*Step, name=beamload
*Surface, type=ELEMENT, name=_G7
```

# Cr ation d'un mod le avec ABAQUS CAE

## Les 7 tapes de la cr ation É du mod le

### ¥ 1-G om trie (Module Part)

- Poutre (200x20x25 mm<sup>3</sup>) - beam



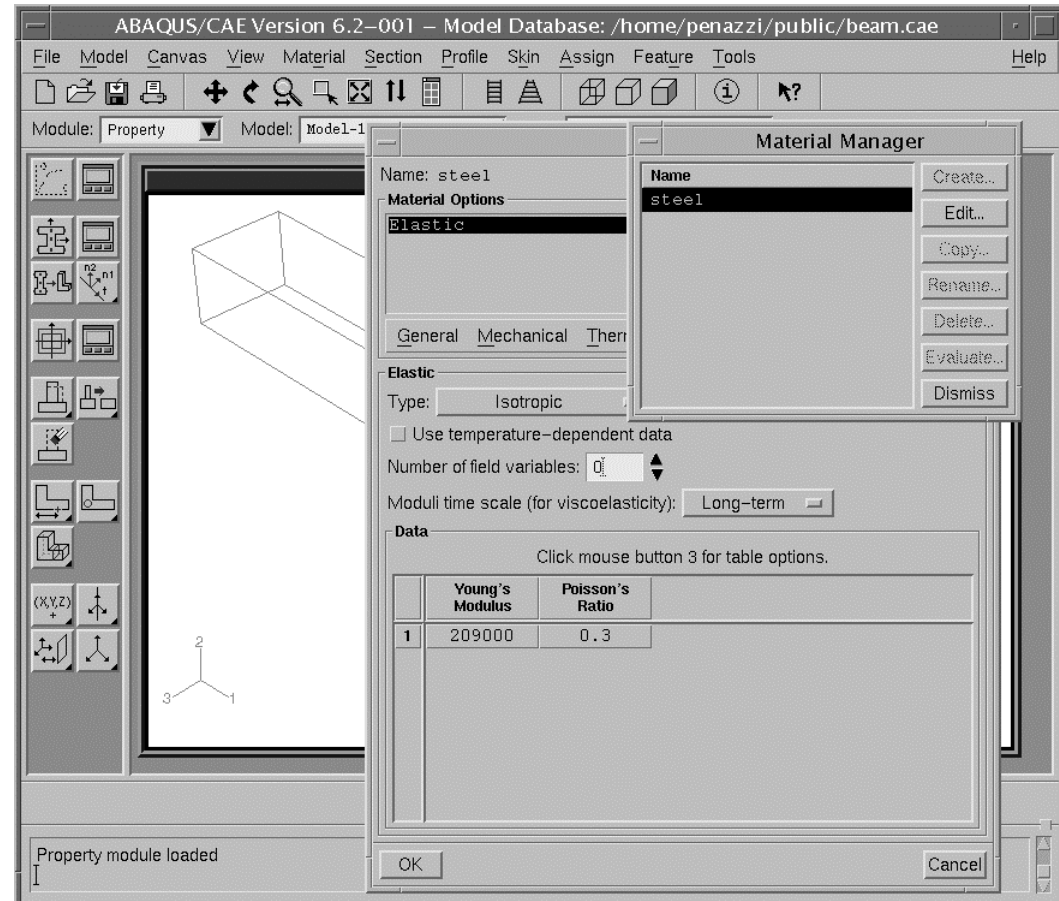
# Création d'un modèle avec ABAQUS CAE

## Les 7 étapes de la création d'un modèle

### 2-Propriétés matériaux (Module Property)

- Material : Isotrope linéaire élastique

$E=209 \cdot 10^3$  MPa,  $\nu=0.3$  : steel

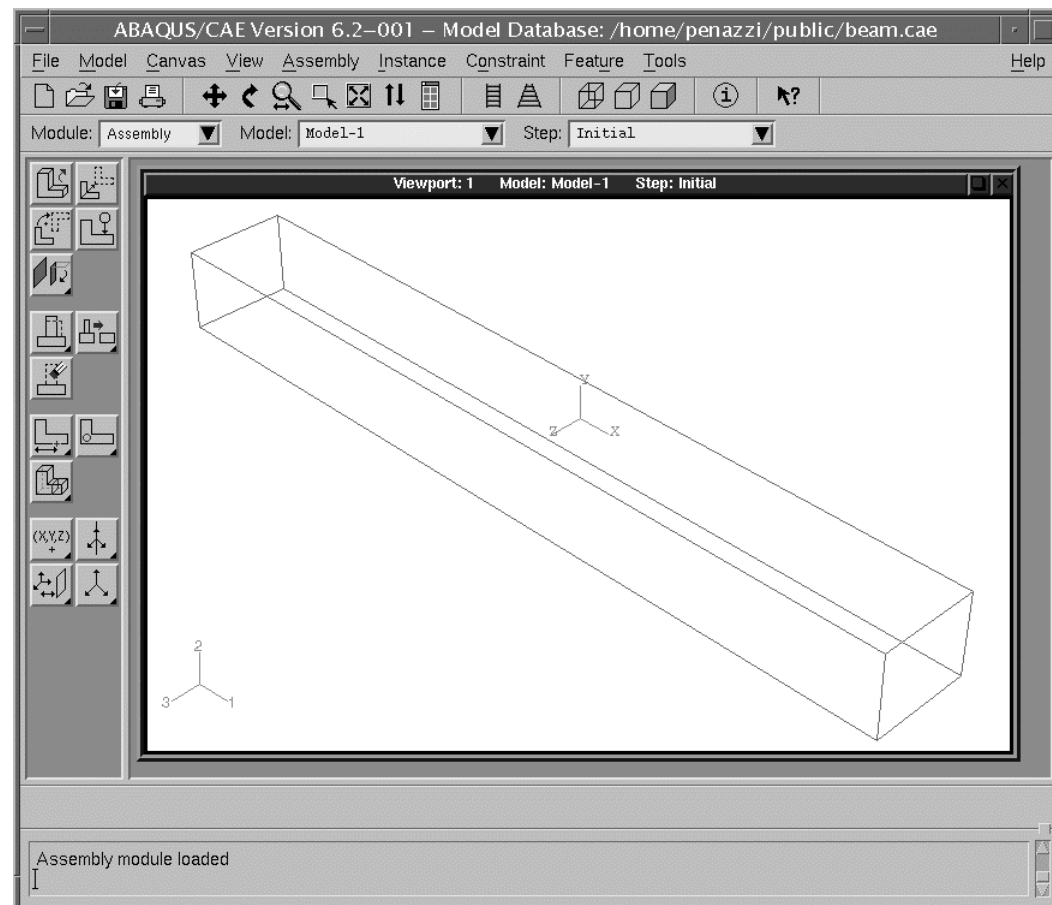


# Cr ation d'un mod le avec ABAQUS CAE

## Les 7 tapes de la cr ation É du mod le

### ¥ 3-Assemblage du mod le (Module Assem bly)

— Assembly : beam

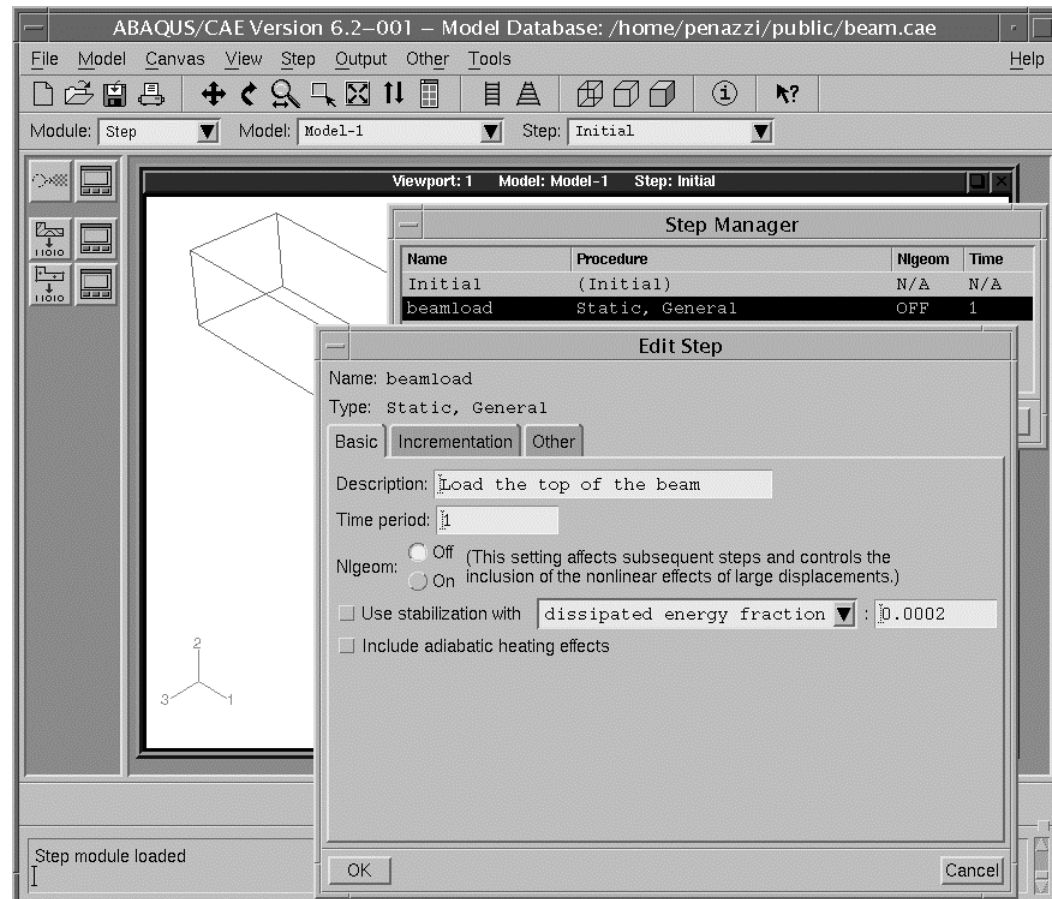


# Création d'un modèle avec ABAQUS CAE

## Les 7 tapes de la création É du modèle

### ¥ 4-Etape de calcul (Module Step)

- Step : Beamload, static, general,
- Output : field output request



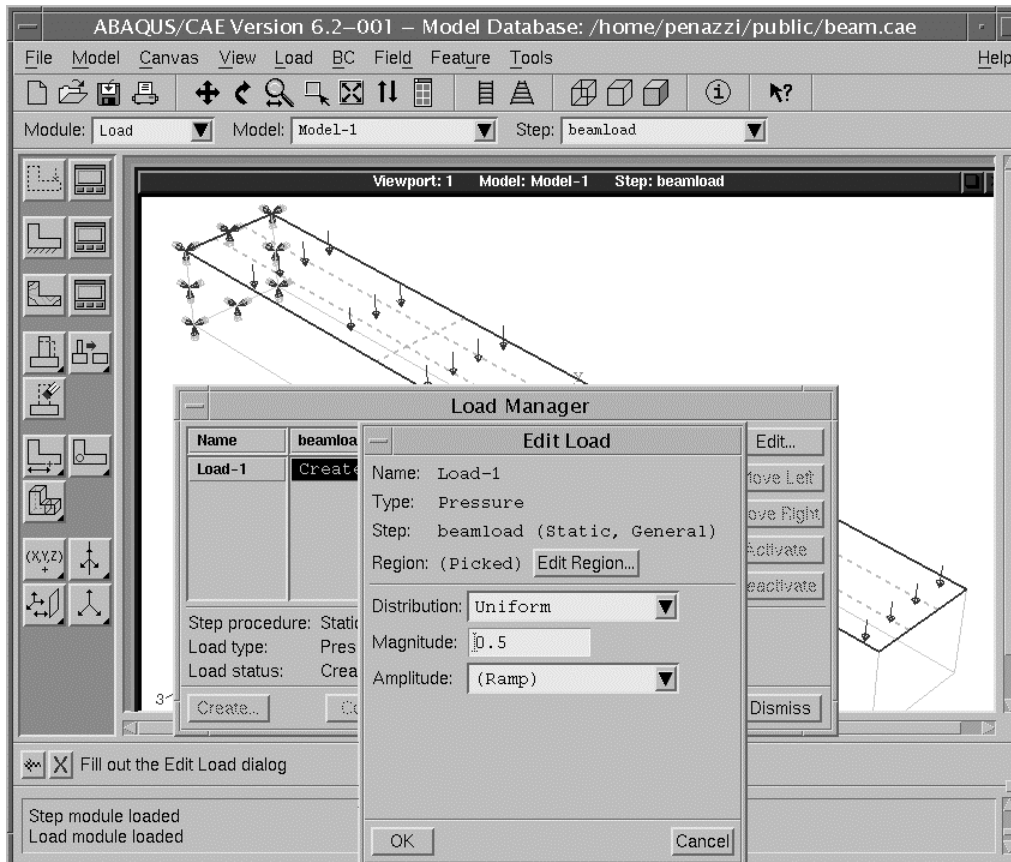


# Création d'un modèle avec ABAQUS CAE

## Les 7 tapes de la création É du modèle

### ¥ 5-Conditions aux limites et chargement (Module Load)

- BC : fixed initial (encastrement à l'origine)
- Load : pression 0,5 MPa

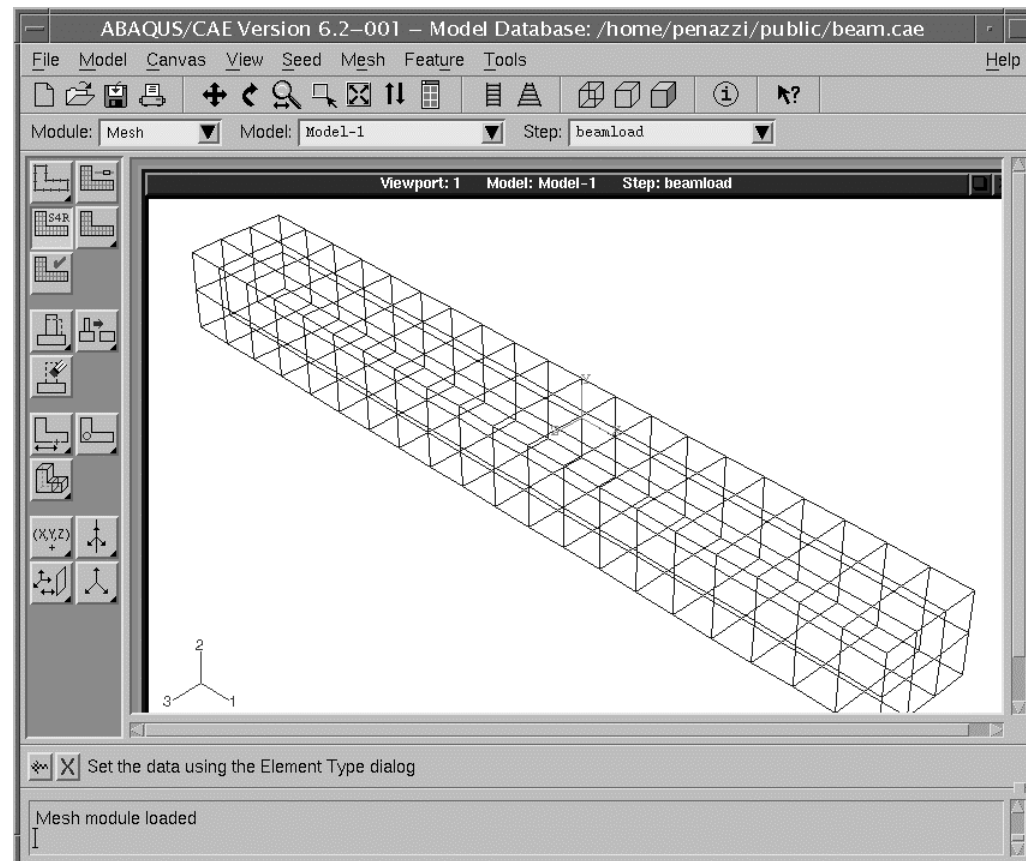


# Cr ation d'un mod le avec ABAQUS CAE

## Les 7 tapes de la cr ation É du mod le

### ¥ 6-Maillage (Module Mesh)

- Hexa - Analyse en contraintes - 10 mm de pas

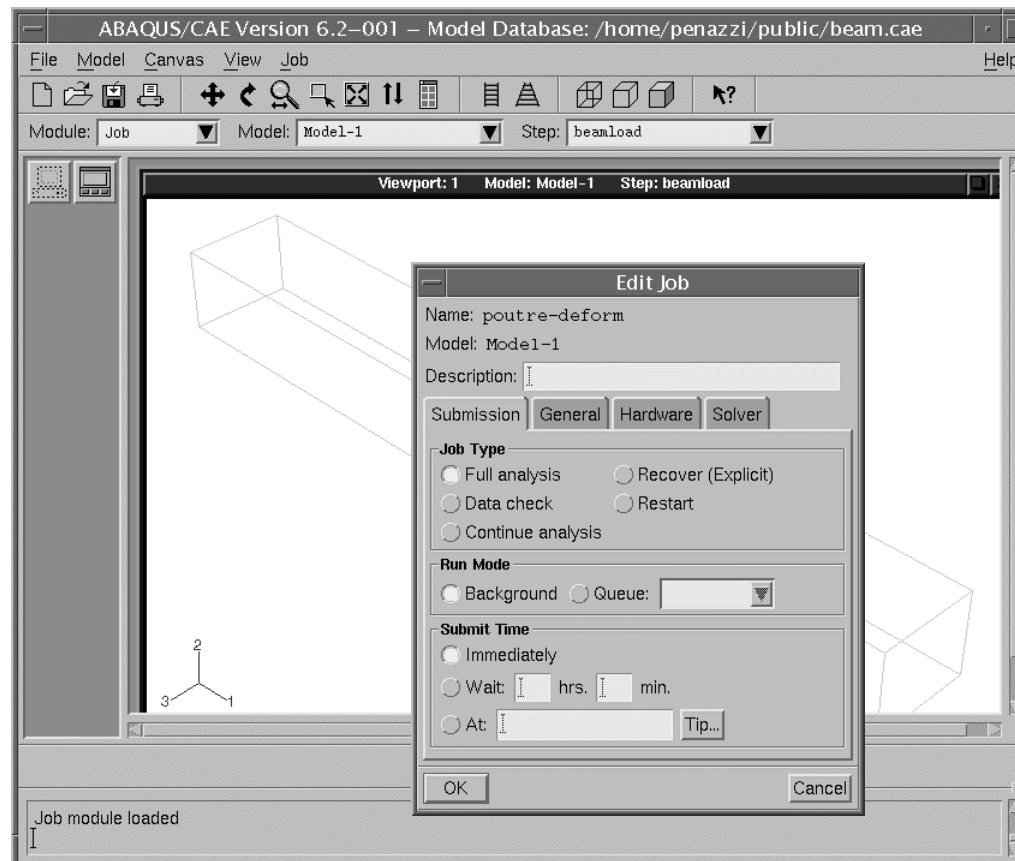


# Création d'un modèle avec ABAQUS CAE

## Les 7 étapes de la création d'un modèle

### 7- Préparation de la résolution (Module Job)

- Job = poutre-deform



# La réalisation du calcul sous UNIX

## Passage sous UNIX

- ¥ Connexion à la machine locale ou sinon serveur si besoin (plus de rapidité)
- ¥ Lancement du calcul

— En interactif

```
abaqus job=poutre-deform interactive
```

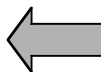
— En tâche de fond

```
abaqus job=poutre-deform
```

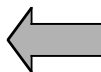
poutre-deform.inp



poutre-deform.log  
poutre-deform.dat  
poutre-deform.odb



*poutre-deform.log*  
*poutre-deform.dat*  
*poutre-deform.odb*  
poutre-deform.msg  
poutre-deform.fil



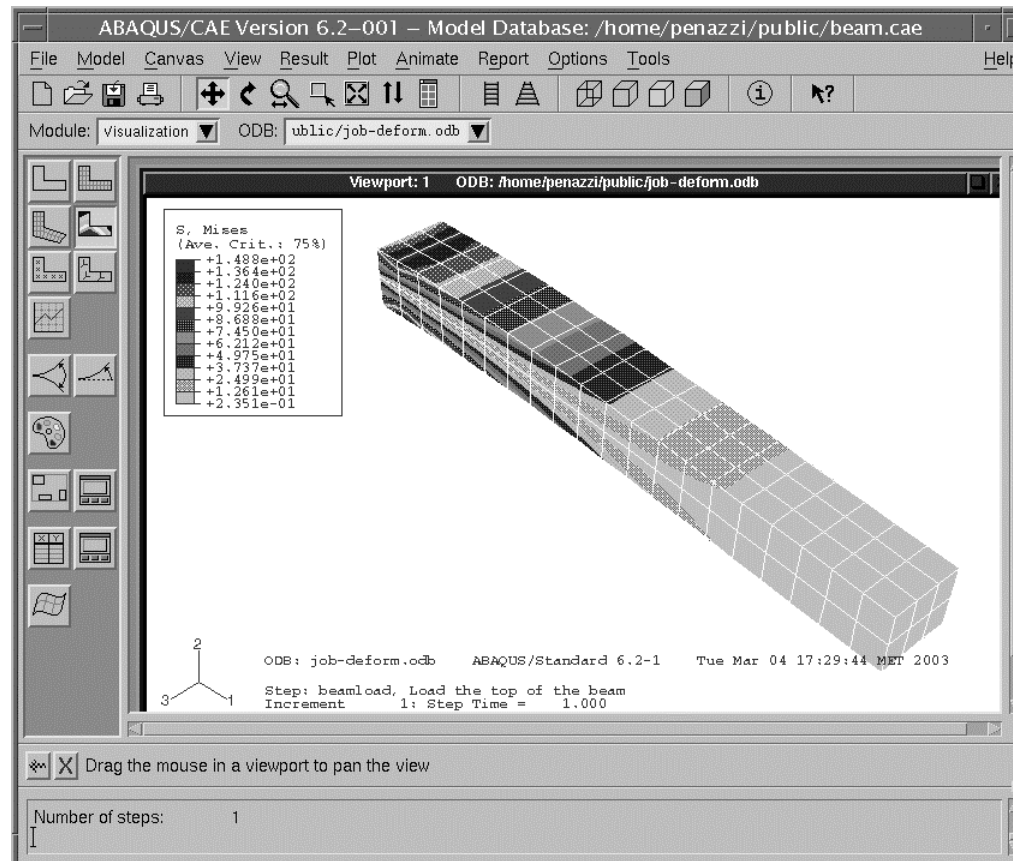
<b>1</b>	<pre> ABAQUS JOB job-deform Begin Solver Input File Processor Tue Mar 04 17:29:36 2003 Run /usr/local/abaqus_6.2/6.2-1/exec/pre.x ABAQUS/STANDARD is running on a Category B machine and has checked out 5 Network Tokens from the license server on nation (10 network tokens out of 15 remain available). Tue Mar 04 17:29:45 2003 End Solver Input File Processor                 </pre>
<b>2</b>	<pre> Begin ABAQUS/Standard Analysis Tue Mar 04 17:29:45 2003 Run /usr/local/abaqus_6.2/6.2-1/exec/standard.x ABAQUS/STANDARD is running on a Category B machine and has checked out 5 Network Tokens from the license server on nation (10 network tokens out of 15 remain available). Tue Mar 04 17:29:57 2003 End ABAQUS/Standard Analysis ABAQUS JOB job-deform COMPLETED                 </pre>

# L'analyse des résultats avec ABAQUS CAE

## Retour dans ABAQUS CAE

### ¥ Visualisation des résultats (Module Visualization)

- Sélection du fichier "odb" : poutre-deform.odb
- Affichage des contours : plot > contours (par défaut V. Mises)



Retour