

Introduction à la simulation de phénomènes non linéaires avec LS-DYNA

Sébastien Thibaud

Plan de l'exposé (1)

➤ Aspects théoriques

- Types de problèmes à résoudre (exemples)
- Non linéarités : géométriques et matérielles
- Phénomènes quasi-statiques et dynamiques
- Approches numériques par la méthode EF : Lagrangienne, Eulérienne et ALE
- Approches numériques par méthodes particulières : SPH et EFG
- Couplage des méthodes EF et particulières : intérêts
- Algorithmes d'intégration : Méthodes explicites
- Algorithmes d'intégration : Méthodes implicites
- Stabilité de la méthode explicite : Condition CFL
- Technologie des éléments finis de coques (2D) et volumiques (3D)
- Sous intégration des éléments : intérêts et problématiques
- Modes d'Hourglass : théorie et contrôle
- Contacts : algorithmes et applications dans LS-DYNA

Plan de l'exposé (2)

- Structure d'un fichier de données avec LS-DYNA (Keyword)
- Choix de lois de comportement adaptées aux matériaux considérés
- Différents exemples en mécanique, mécanique des fluides, thermique et problèmes couplés

Préambule

- Ce manuel n'est qu'une introduction à l'utilisation de LS-DYNA
- Initialement, il a été écrit dans le but d'aider les élèves ingénieurs de l'ENSMM et les étudiants de Master pour comprendre et approfondir leurs connaissances sur les méthodes numériques en physiques
- Ce cours vient en complément du cours théorique du Pr. J.C. Gelin sur les techniques numériques en physiques et mécaniques
- Le lecteur trouvera ici ce qui me semble important de connaître pour utiliser un code éléments finis non-linéaires
- Ceci n'est que mon avis, mais avec l'expérience et les nombreuses (mêmes) questions posées, je pense qu'il y a l'essentiel
- La suite n'est qu'un apprentissage de techniques spécifiques aux numériciens
- Il reste bien des choses à écrire ...
- Pour des études plus complexes, il existe plusieurs techniques
 - La plus simple : on ne fait rien ...
 - La deuxième : on tente ...
 - La troisième : on se renseigne et/ou on demande ...

Philosophie (d'étudiants)

« Ce n'est pas parce que l'on connaît parfaitement la théorie...
... que l'on sait se servir d'un code de calcul.

Par contre si on ne la connaît pas ...

... on ne sera jamais si ce que l'on simule est proche de la physique. »

« Un ingénieur doit être capable de déterminer les problèmes ...
... et surtout savoir les résoudre. »

« On diminue le temps de simulation pour que le temps de calcul diminue. »

Un étudiant qui a oublié de réfléchir
...

« Les temps de calcul sont trop long ... »

Un ami du précédent étudiant

« L'étudiant doutant du résultat de ses calculs est un étudiant qui arrivera mieux à se convaincre qu'ils sont justes »

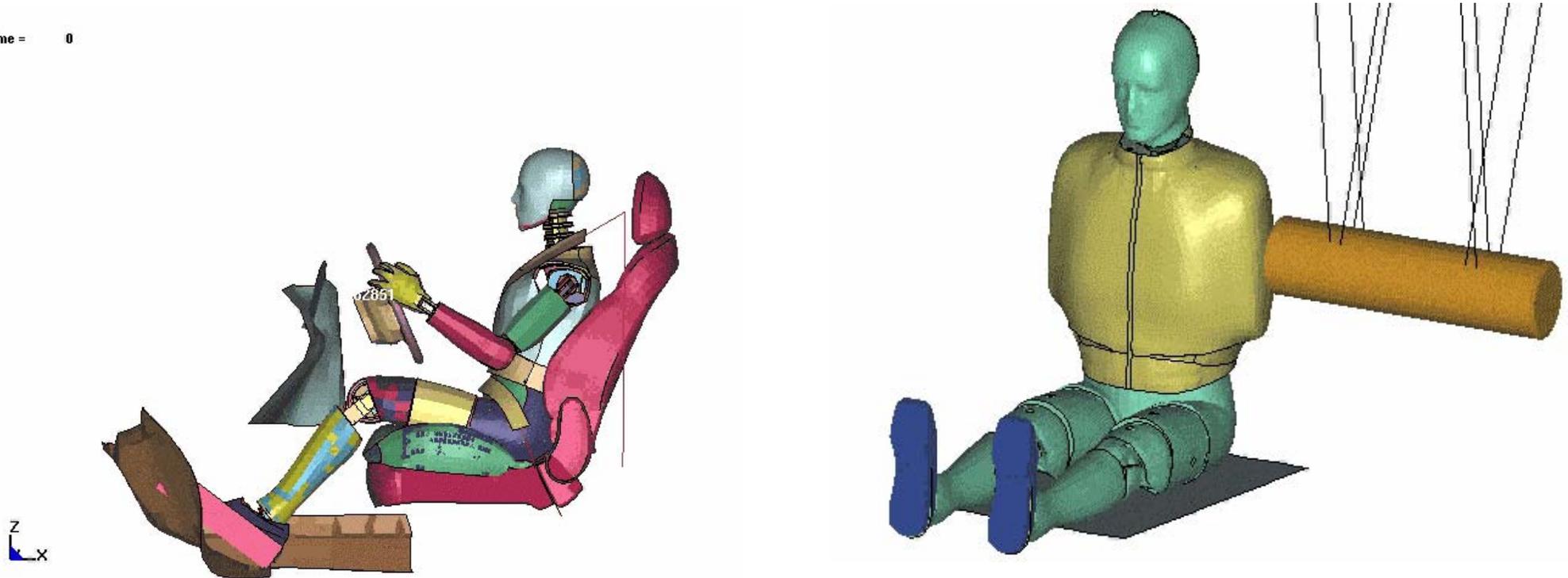
Un ingénieur calculs est né

Quelques exemples

Quelques exemples d'applications avec LS-DYNA

Biomécanique

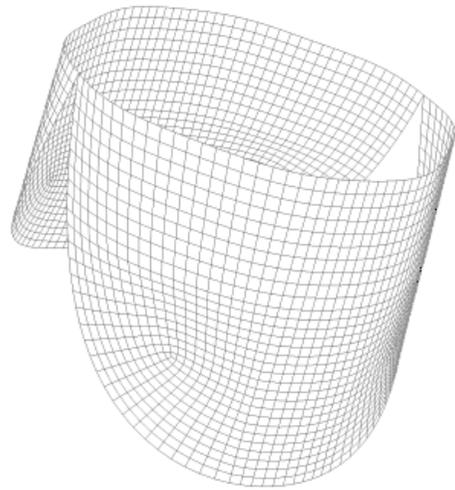
Time = 0



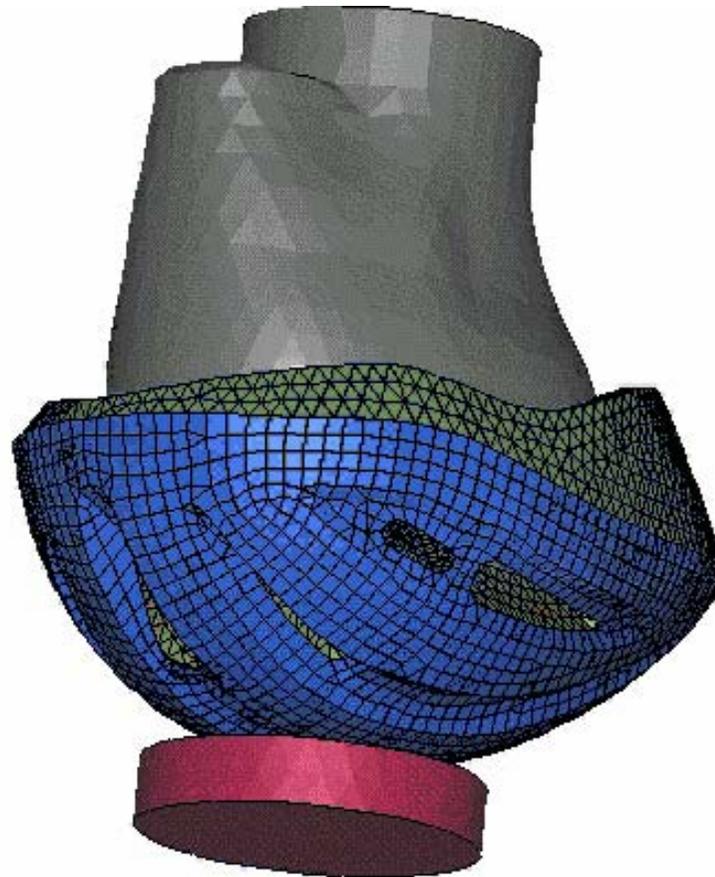
Mannequins (Dummies) pour la sécurité des passagers ou piétons

- Ces mannequins sont très complexes (prise en compte de toute la cinématique humaine, limitation physique ...)
- Il est possible d'en obtenir gratuitement pour faire de la simulation ...

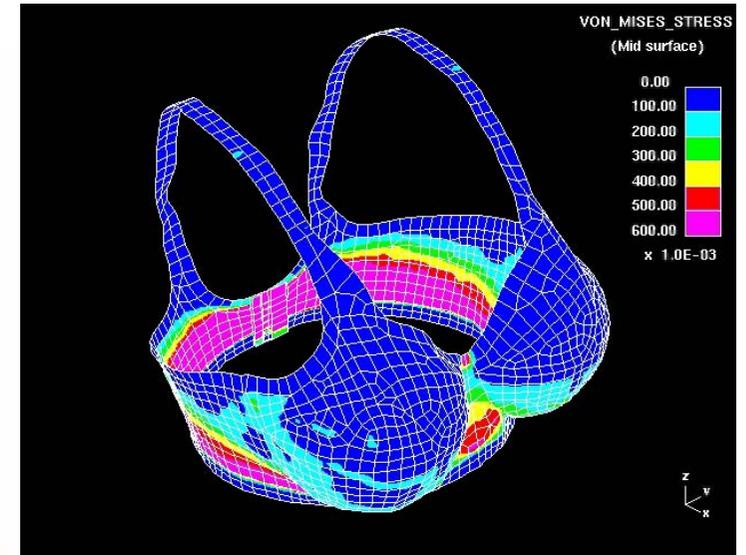
Biomécanique



Comportement de la valve aortique



Modélisation d'un choc avec protection

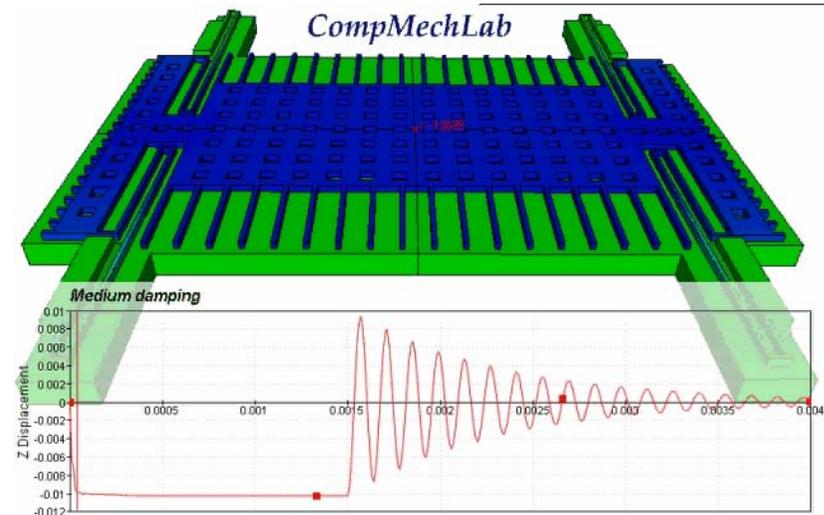
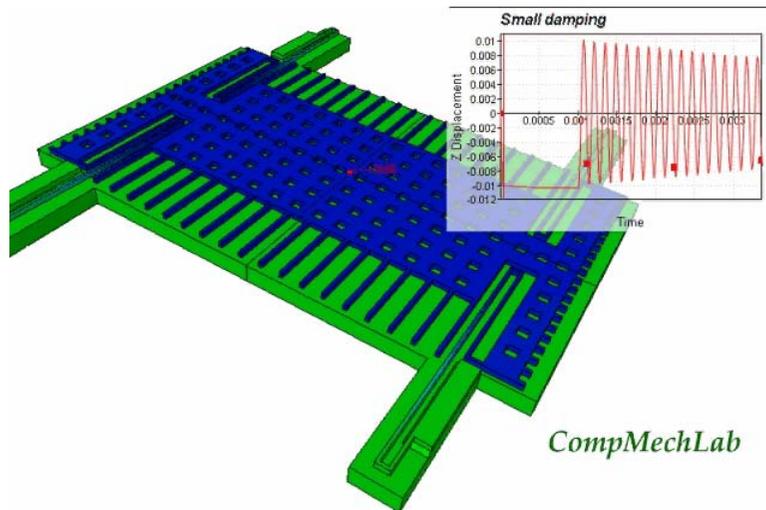


Simulation du « confort » en course à pied d'un soutien-gorge

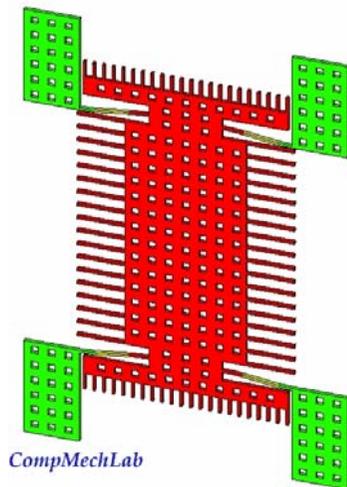
Biomécanique

- Modélisation de système mécanique : tir à l'arc, cyclisme, golf, tennis
- Simulation interaction homme/machine/fluide : aérodynamique
- Modélisation de systèmes dans le corps humain : stent, pacemaker, prothèses...
- Caractérisation des matériaux biologiques
- Il existe des lois de comportement pour les poumons, les muscles ...
- Il existe au total 400 lois de comportements dans LS-DYNA avec la possibilité d'en programmer
- ...

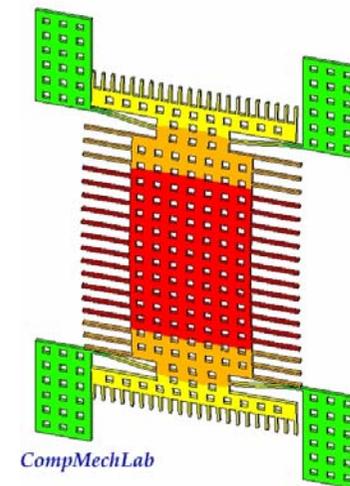
Microtechniques



Analyse dynamique d'un micro-accéléromètre avec prise en compte de l'interaction entre l'élément en silicone et le substrat en verre epoxy



Modes propres d'un MEMS

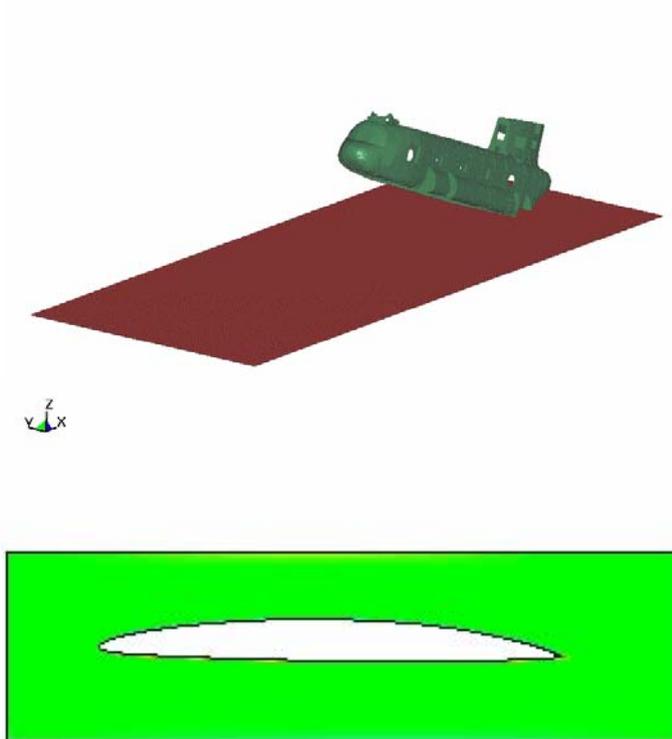


Mécanique des fluides

Interaction fluide-structure (ALE)

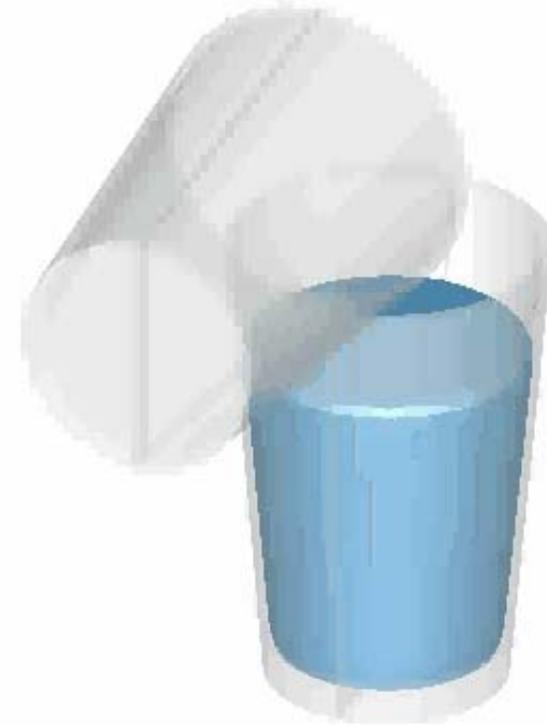
Impact d'un hélicoptère sur l'eau

Time = 0



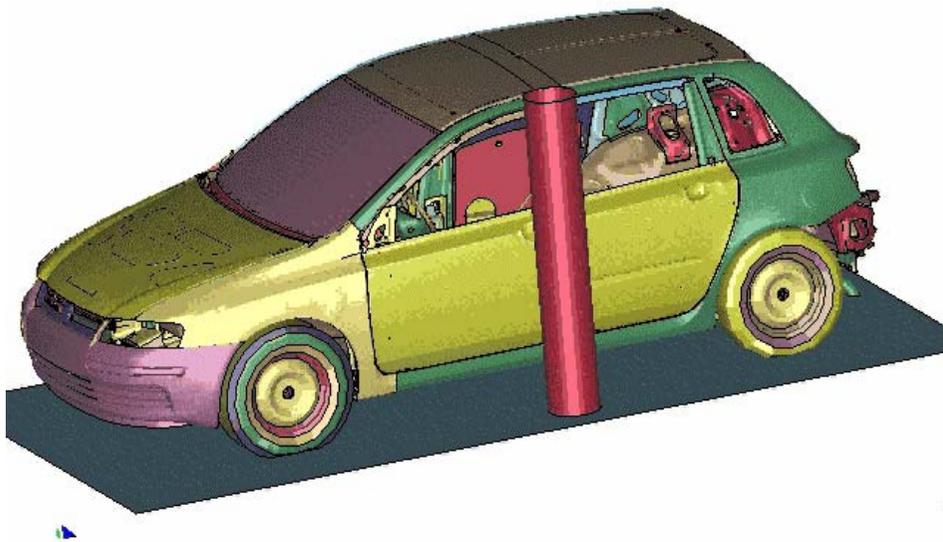
Écoulement autour d'un profil
d'aile d'avion

CompMechLab

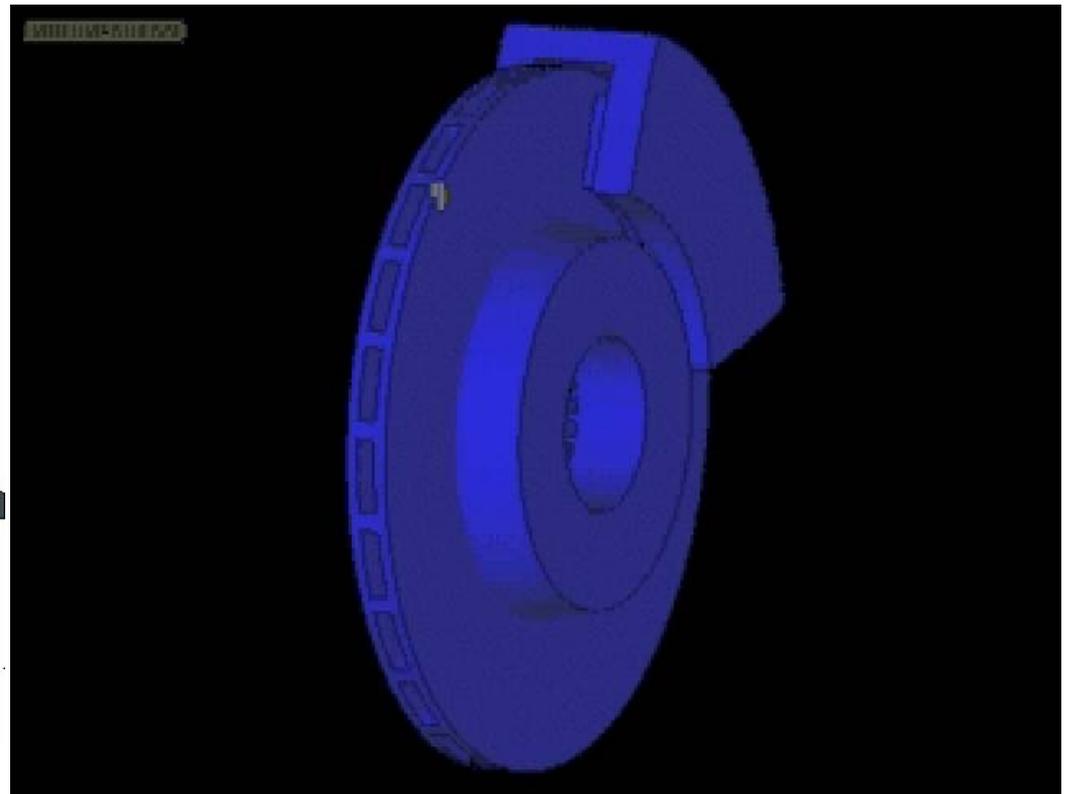


Interaction fluide-structure (ALE)

Mécanique

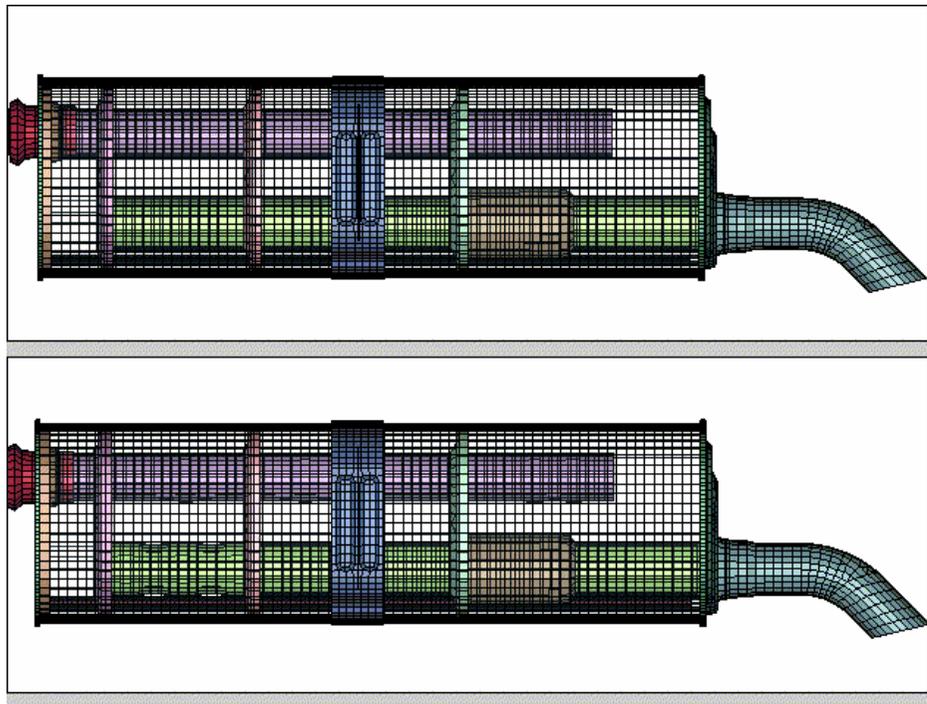


Crash Latéral (Test EuroNCap)



Usure de plaquette de frein

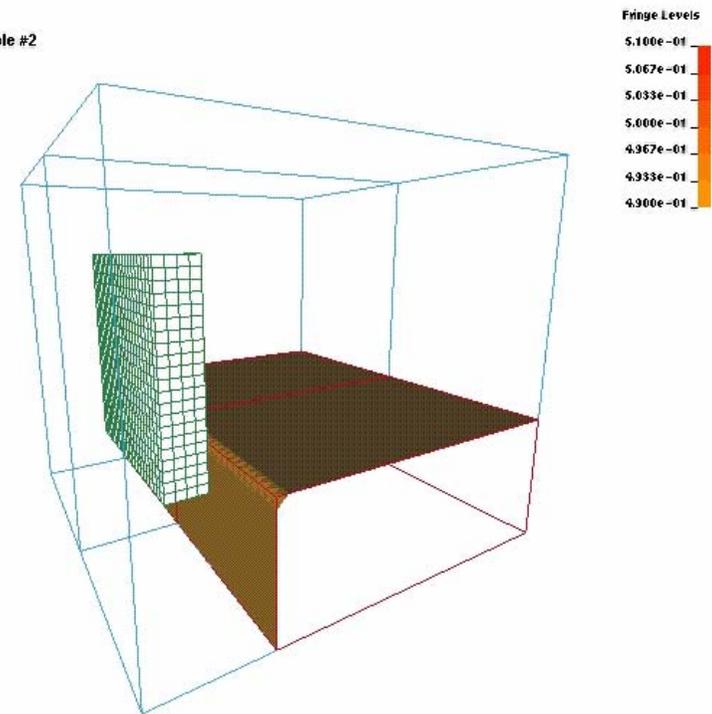
Mécanique



Crash d'une ligne d'échappement

F. Collin (PFE 2004 - Faurecia)

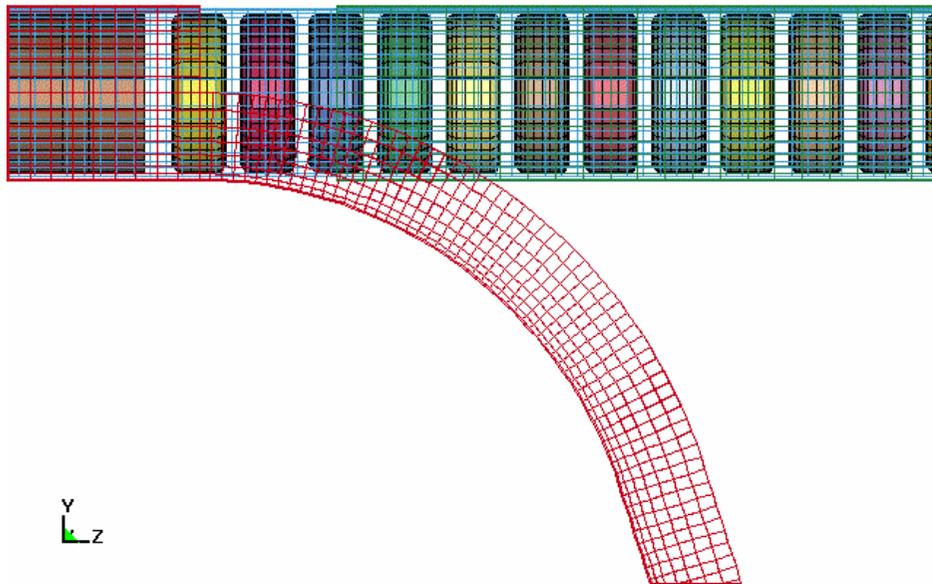
Contours of history variable #2
min=0, at elem# 7201
max=1, at elem# 1



Usinage Grande Vitesse

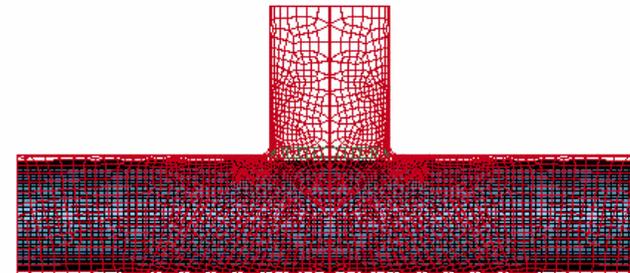
Mécanique – Mise en forme

CINTRAGE D'UN TUBE
Time = 0



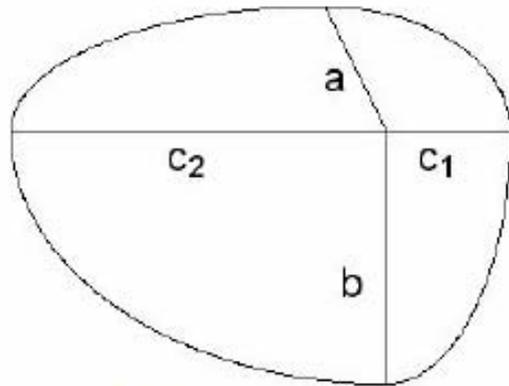
Cintrage de tube

HYDROFORMAGE EN T
Time = 0



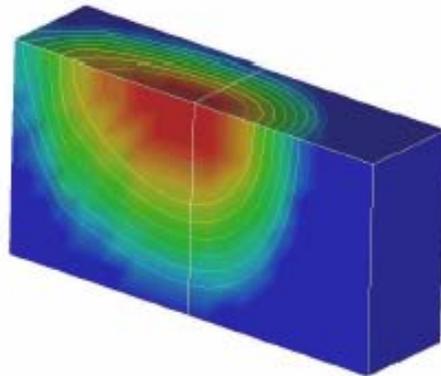
Hydroformage de tube

Thermique

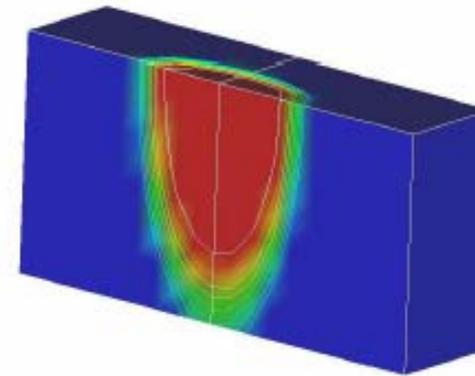


$$\dot{q}_f''' = \frac{6\sqrt{3}F_f Q}{abc_1\pi\sqrt{\pi}} e^{-\frac{3x^2}{a^2}} e^{-\frac{3y^2}{b^2}} e^{-\frac{3(z+vt)^2}{c_1^2}}$$

$$\dot{q}_r''' = \frac{6\sqrt{3}F_r Q}{abc_2\pi\sqrt{\pi}} e^{-\frac{3x^2}{a^2}} e^{-\frac{3y^2}{b^2}} e^{-\frac{3(z+vt)^2}{c_2^2}}$$



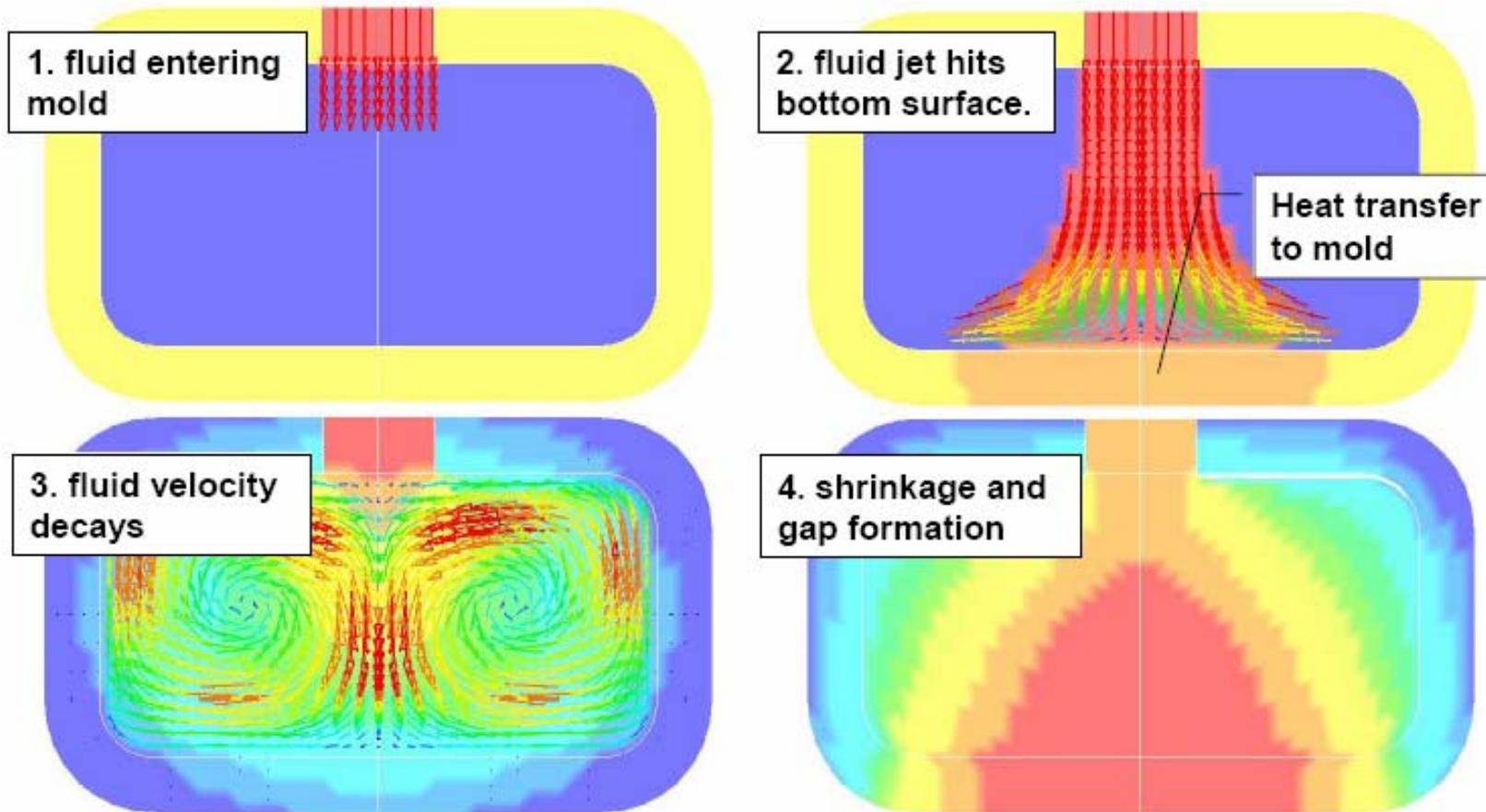
TIG a=1, b=2, c₁=1, c₂=4



Laser a=1, b=5, c₁=1, c₂=1

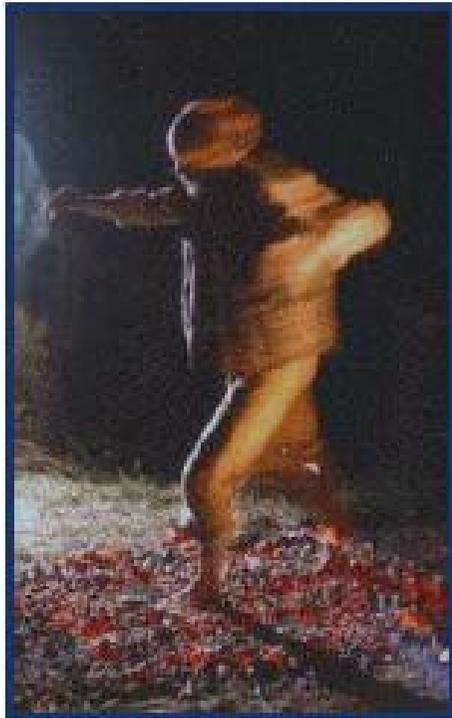
Soudure TIG/Laser

Thermique



Moulage : Couplage fluide/Structure/Thermique puis refroidissement (dilatation)

Thermique



Épiderme

Cendre



$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla k \nabla T - W_b C_b (T - T_b)$$

Transfert thermique associé à l'écoulement du sang (Conduction)

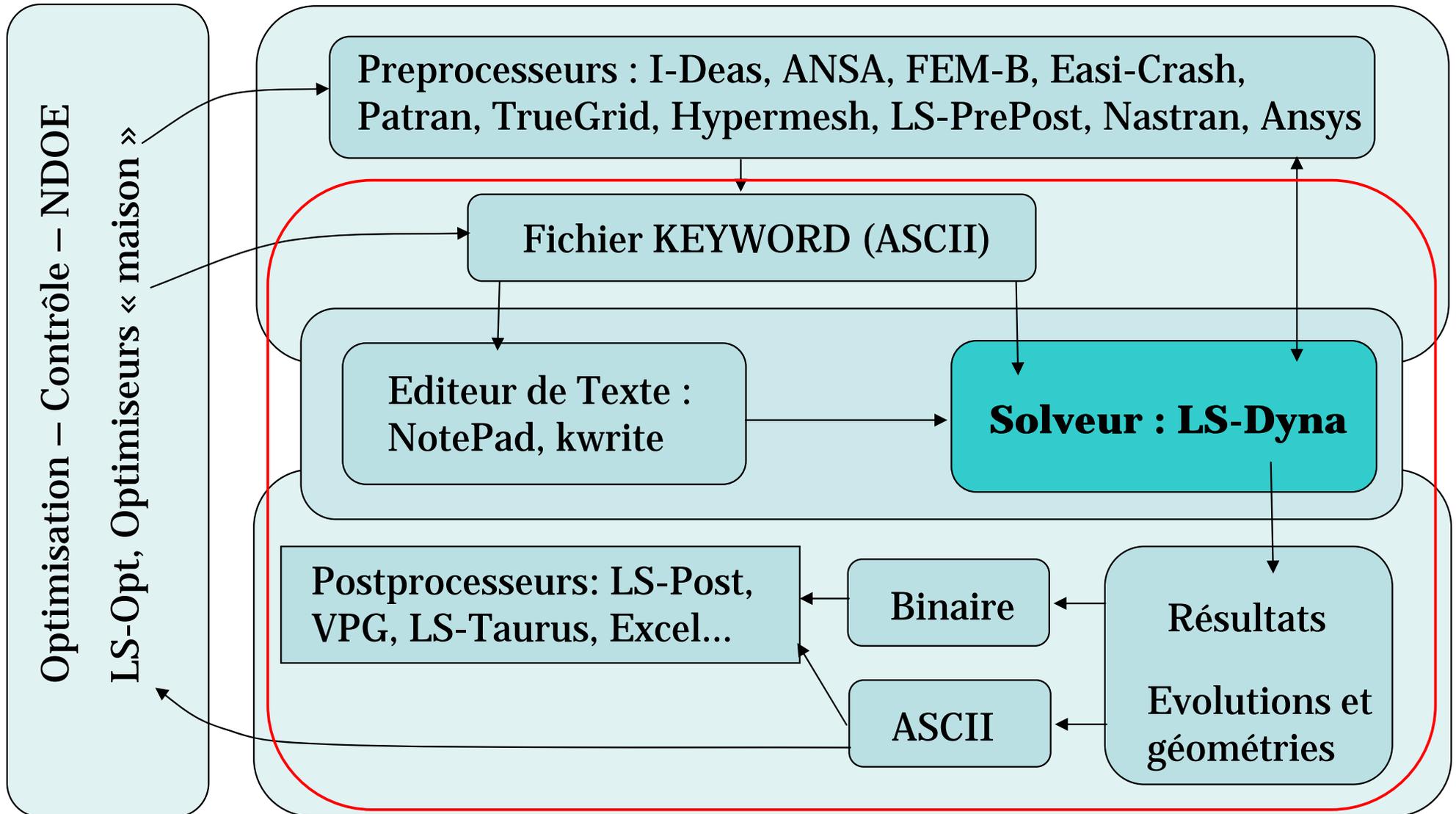
Simulation du comportement de la voute plantaire pour un homme marchant sur des cendres

Couplage Biothermique

Structures des fichiers Keyword

Solveur LS-Dyna
Structure d'un fichier de données
Lancement d'un calcul
Pre/Post-traitement avec LS-Post

Fonctionnement de LS-Dyna



LS-DYNA: Keyword file

- Un calcul avec le solveur de Dyna se fait par le biais d'un fichier ASCII : keyword file
- Ce fichier est composé de mots clés nécessaires à la résolution du problème donné
- Ce fichier est toujours débuté par *KEYWORD et terminé par *END (*-> définit un mot clé)
- Les commentaires sont définis par un \$ en début de ligne
- La mise en donnée peut se faire avec un pré-processeur : FEMB, LS-TAURUS, I-DEAS, HYPERMESH, EASi-CRASH, ANSA...
- Il est cependant nécessaire d'ouvrir les manuels (Mots-clés et théoriques) : ils sont gratuits et disponibles sur www.lsdyna.com (ou dans les bonnes crémeries liées à LSTC ...)
- Dans notre cas, on se contentera de mettre en données des problèmes à l'aide d'un éditeur de texte
- Pour cela, ouvrir le Keyword manual (v970)

Structure d'un fichier Keyword (1)

- Dans notre cas, nous tenterons de donner une méthodologie permettant un « débuggage » rapide et cohérent avec le calcul

```

*KEYWORD
$---+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+-----8
*TITLE
Exemple de fichier KEYWORD
$---+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+-----8
$
$                                CONTROL CARD                                $
$
$
$---+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+-----8
*CONTROL_TERMINATION
$  ENDTIM      ENDCYC      DTMIN      ENDENG      ENDMAS
    0.0180      0          0.0        0.0        0.0
...

*END

```

Structure d'un fichier Keyword (1) - *CONTROL

```

...
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
$                                CONTROL CARD                                $
$                                                                $
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*CONTROL_TERMINATION
$  ENDTIM      ENDCYC      DTMIN      ENDENG      ENDMAS
   x.xxxxx      0          0.0        0.0         0.0
*CONTROL_TIMESTEP
$  DTINIT      TSSFAC      ISDO      TSLIMT      DT2MS      LCTM      ERODE      MS1ST
   0.000      0.90        0         0.0         0.000      0         0         0
*CONTROL_CONTACT
$  SLSFAC      RWPNAL      ISLCHK      SHLTHK      PENOPT      THKCHG      ORIEN
   .100      .000         2          1          4          0          1
$  USRSTR      USRFAC      NSBCS      INTERM      XPENE      SSTHK      ECDT      TIEDPRJ
   0          0          10         0          4.000      0
*CONTROL_HOURLASS
$  IHQ         QH
   4          0.10
*CONTROL_BULK_VISCOSITY
$  Q1         Q2         TYPE
   1.500      .060         1
*CONTROL_SHELL
$  WRPANG      ESORT      IRNXX      ISTUPD      THEORY      BWC      MITER      PROJ
   20.0       2         -1         1          2          2         1         0
*CONTROL_ENERGY
   2          1          2          1
*CONTROL_IMPLICIT_(OPTION)
...

```

Structure d'un fichier Keyword (2) - *DATABASE

```

...
*DATABASE_EXTENT_BINARY
$  NEIPH      NEIPS      MAXINT      STRFLG      SIGFLG      EPSFLG      RLTF LG      ENGFLG
  5,5,,1
$  CMPFLG      IEVERP      BEAMIP      DCOMP      SHGE      STSSZ

$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
$
$          DATABASE CONTROL FOR ASCII
$
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*DATABASE_ASCII
$      DT      BINARY
  Y.YYYY
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
$
$          DATABASE CONTROL FOR BINARY
$
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$  DT/CYCL      LCDT      BEAM      NPLTC
  Z.ZZZZ
*DATABASE_BINARY_RUNRSF
$  DT/CYCL      LCDT      NOBEAM
  Z.ZZZZ
*DATABASE_BINARY_D3THDT
$  DT/CYCL      LCDT
  Z.ZZZZ
...

```

Structure d'un fichier Keyword (4)

```

...
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
$
$                PART CARDS
$
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*PART
$HEADING
BLANK
$      PID      SECID      MID      EOSID      HGID      GRAV      ADOPT      TMID
$          1          1          1          0          0
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
$                SECTION CARDS
$
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*SECTION_SHELL
$      sid      elform      shrf      nip      propt      qr/irid      icomp
$          1          2          1.0          5.0
$
$      t1      t2      t3      t4      nloc
1.0,1.0,1.0,1.0
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
$                MATERIAL CARDS
$
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*MAT_RIGID
$^FIXE
$      MID      RO      E      PR      N      COUPLE      M      ALIAS
$          1 7.830E-09 207000.0 0.28 0.0 0.0 0.0 0.0
$      CMO      CON1      CON2
$          1.0      7.0      7.0
$LCO_OR_A1      A2      A3      V1      V2      V3
$          0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
...

```

Structure d'un fichier Keyword (5) - Mouvements

```

...
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
$                                BOUNDARY PRESCRIBED CARDS                                $
$                                $                                $
$                                $                                $
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID
$^PRESCRIBED
$      PID      DOF      VAD      LCID      SF      VID      DEATH      BIRTH
$          5          1          2          1          1.0          1.000E+28          0.0
$
*DEFINE_CURVE
1
$
0.0,0.0
x.xxx,y.yyy
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
$                                LOAD RIGID BODY CARDS                                $
$                                $                                $
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*LOAD_RIGID_BODY
$^RIGID
$      PID      DOF      LCID      SF      CID      N1      N2      N3
$    3,1,2,1.0
$
*DEFINE_CURVE
2
$
0.0,240000.0
x.xxx,z.zzzz
...

```

Structure d'un fichier Keyword (6) - Contacts

```

...
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
$                CONTACT CARDS                $
$
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*CONTACT_(OPTION)
$      CID      CONTACT INTERFACE TITLE
$      5        BLANK/LOWER RING
$      SSID      MSID      SSTYP      MSTYP      SBOXID      MBOXID      SPR      MPR
$      1         3         3         3
$      FS        FD        DC         V         VDC        PENCHK      BT        DT
$      .125E+00  .000E+00  .000E+00  .000E+00  .200E+02  00.0000e+001.0000E+20
$      SFS       SFM       SST       MST       SFST      SFMT       FSF       VSF
$      .000E+00  .000E+00  .000E+00  .000E+00
$      SOFT      SOFSCL   LCIDAB   MAXPAR   PENTOL   DEPTH     BSORT    FRCFRQ

$      PENMAX   THKOPT   SHLTHK   SNLOG
$                        1
...

```

Structure d'un fichier Keyword (7) - SPC

```

...
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
$          SPC CARDS          $
$
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*BOUNDARY_SPC_(OPTION)

*CONSTRAINED_GLOBAL

```

...

Structure d'un fichier Keyword (8) - Interface

```

...
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
$                                $
$                                $
$                                $
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*INTERFACE_SPRINGBACK_(OPTION)
  PID      NHV
  1
*SET_PART
  SID
  1
  PID1    PID2    PID3    PID4
  1       2       3       4
...

```

Structure d'un fichier Keyword (9) - Maillage

```

...
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
$          MESH CARDS          $
$
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*NODE
      1  0.000000000E+00  0.000000000E+00  0.000000000E+00      7      0

*ELEMENT_SHELL
      51      2      153      158      140      141

*INCLUDE

*END

```

Unités

Unités Système international

Unités

- Dans la plupart des codes de calculs, les unités sont définies par l'utilisateur
- Certaines erreurs sont associées au choix des unités utilisées
- Il faut alors choisir des unités consistantes les unes avec les autres
- Pour tester la consistance, on rappelle
 - Une unité de force est associée à une unité de masse x une unité d'accélération
 - Une unité d'accélération est définie comme une unité de longueur / le carré d'une unité de temps
- Dans le cas où on utilise le système international on vérifiera

Unités

- Dans le cas où on utilise le système international on vérifiera

	Possibilité 1	Possibilité 2	Possibilité 3
Unité de longueur	Mètre (m)	Millimètre (mm)	Millimètre (mm)
Unité de temps	Seconde (s)	Seconde (s)	Milliseconde (ms)
Unité de masse	Kilogramme (kg)	Tonne (ton)	Kilogramme (kg)
Module d'Young Acier	$210 \cdot 10^6$ Pa	210000 MPa	210 GPa
Masse volumique Acier	$7800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$7,8 \cdot 10^{-9} \text{ ton} \cdot \text{mm}^{-3}$	$7,8 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-3}$
Limite élastique Acier	200000 Pa	200 MPa	0,2 GPa
Accélération de la pesanteur	$9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$	$9810 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$	$9,81 \cdot 10^{-3} \text{ mm} \cdot (\text{ms})^{-2}$

Sauvegardes des résultats

Fichiers Binaires : d3plot,
d3thdt, d3dump
Fichiers ASCII
Database

Fichiers binaires

- Dans la suite, on va utiliser le logiciel LS-PrePost pour post-traiter les résultats
- LS-PrePost recueille les résultats par utilisations combinées
 - De fichiers binaires
 - De fichiers textes (ASCII)
- Dans LS-Dyna, on définit la fréquence de sauvegarde de ces fichiers
 - Dans le cas des fichiers binaires d3plot, d3thdt et d3dump

```
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$ DT/CYCL
  1.0000e-4
*DATABASE_BINARY_D3THDT
$ DT/CYCL
  1.0000e-4
*DATABASE_BINARY_D3DUMP
$ DT/CYCL
  1.0000e-4
```

Fichiers d3plot

- Dans le cas des sauvegardes graphiques (d3plot), on sauvegarde l'intégralité des résultats
 - Contraintes, déformations (composantes, normes, invariants)
 - Accélérations, vitesses et déplacements
 - Variables historiques, température, pression, épaisseurs
- Le nombre de sauvegardes est donnée par

$$n = \text{tps total} \times \text{freq} = \frac{\text{tps total}}{\text{DT/CYCL}}$$

Fichiers d3plot

- Lorsque l'on utilise des lois de comportement comportant des variables historiques, on doit informer LS-Dyna de les sauvegarder
- Lois avec endommagement *MAT_GURSON, *MAT_DAMAGE (Lemaitre) : VH1= variable d'endommagement (ou fraction volumique de vide)
- Lois avec écrouissage cinématique *MAT_KINEMATIC (5 variables historiques relatives à l'écrouissage cinématique), anisotropie thermique ...
- Il en va de même dans le cas où l'on utilise plus de 3 points d'intégration dans l'épaisseur des coques
- Pour cela on utilise le mot clé

```
*DATABASE_EXTENT_BINARY  
$      NEIPH      NEIPS      MAXINT  
  
$
```

- NEIPH : Nombre de variables historiques à sauvegarder pour les éléments volumiques
- NEIPS : Nombre de variables historiques à sauvegarder pour les éléments de coques
- MAXINT : Nombre de points d'intégration dans l'épaisseur à sauvegarder (pour les coques uniquement)

Fichiers d3plot

- Le mot clé *DATABASE_D3THDT permet de sauvegarder les évolutions de certains nœuds ou éléments
- Il est à combiner avec le mot clé *DATABASE_HISTORY_(OPTION)
- Le mot clé *DATABASE_D3DUMP permet de créer des fichiers de restart (voir restart)

Fichiers ASCII

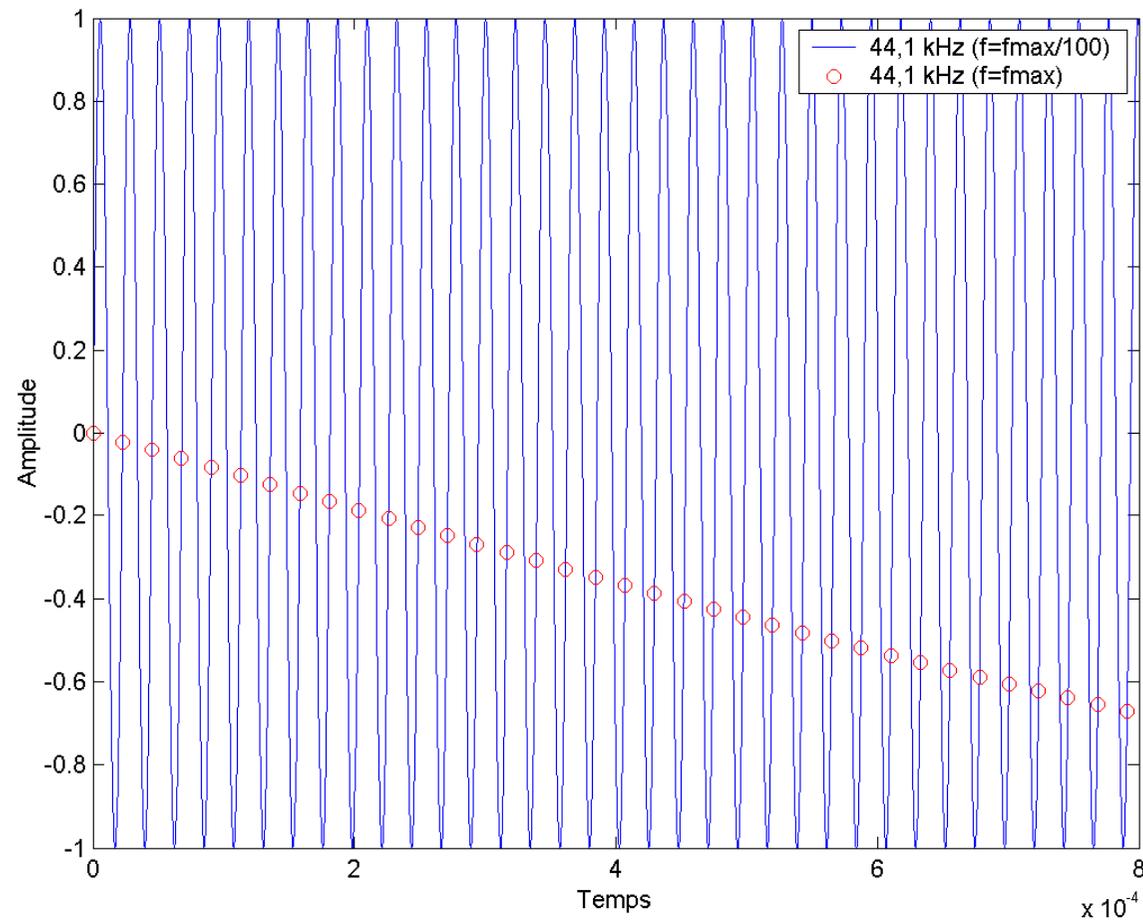
- Il est possible de sauvegarder les évolutions complètes sous la forme de fichiers ASCII (texte)
- Ceci est utile pour faire de l'optimisation, du contrôle ou de l'identification
- Les fichiers peuvent être ouverts dans un autre programme (MATLAB, « code maison », LS-OPT...)
- La sauvegarde des évolutions est assez délicate
- En théorie, pour reconstruire un signal sans perte d'informations, la fréquence d'échantillonnage doit être deux fois plus importante que la fréquence fondamentale du signal à reconstruire (théorème de Shannon)
- Néanmoins, la fréquence fondamentale est donnée par l'inverse du pas de temps
- Cela donne lieu à un nombre exorbitant de sauvegardes (volume de sauvegardes gigantesques)
- En pratique, on sauvegarde d'une centaine de points (monotones) à un millier de points (crash)

Fichiers ASCII

- On utilise pour cela les mots-clé *DATABASE_(OPTION)
- GLSTAT : Statistiques globales (Toujours sauvegarder)
- RCFORC : Efforts de contact
- SLEOUT : Lieux de contact
- ABSTAT : Statistique Airbag (utilisé dans le cas d'un contrôle de fluide en volume)
- MATSUM : Énergies par pièces
- Il existe d'autres cartes de sorties (voir Manuel utilisateur si besoin)

Fichiers ASCII I

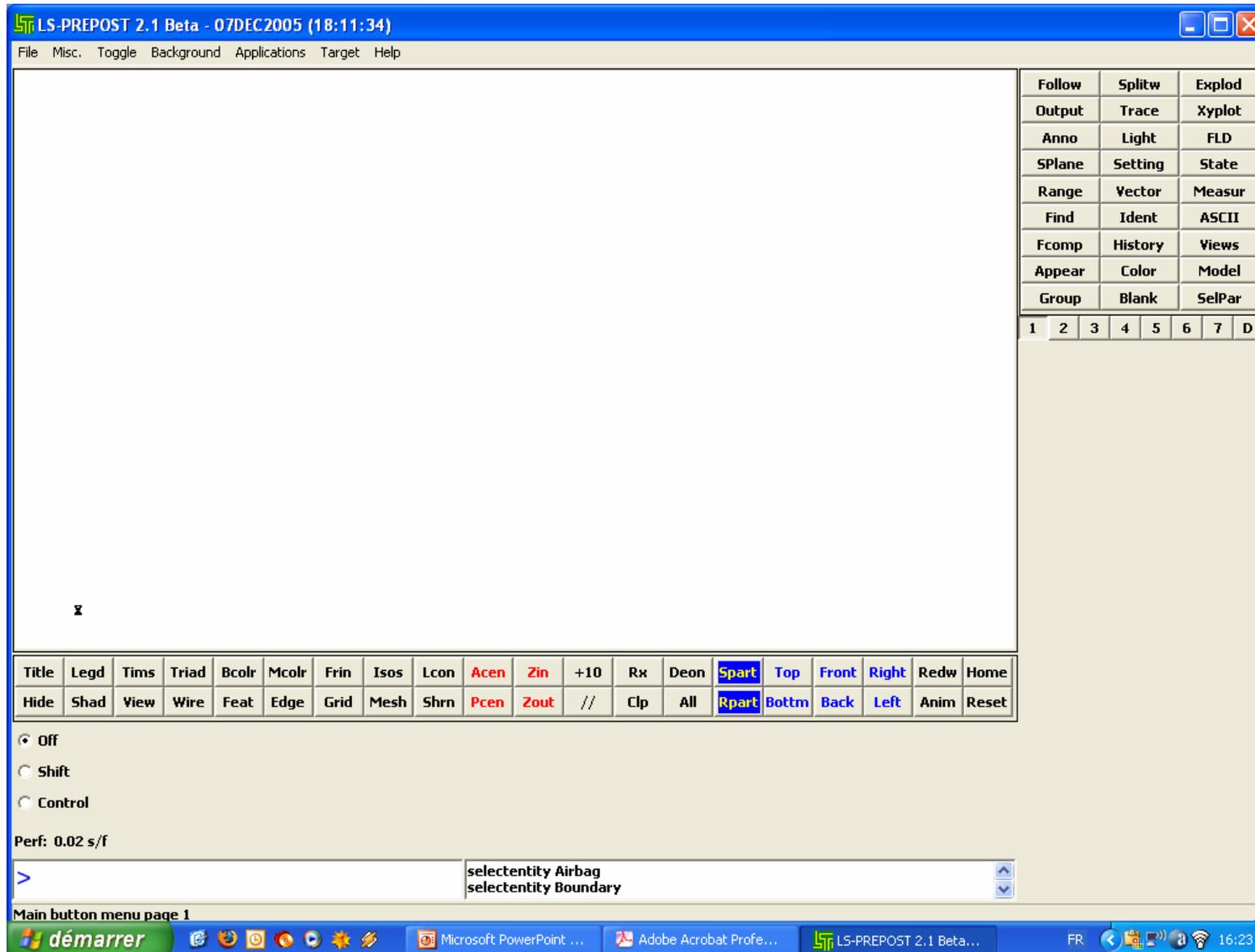
- Exemple d'aliasing pour un signal sinusoïdal (fréquence 44,1 kHz) échantillonné à $f=f_{\max}/100$ et $f=f_{\max}$



LS-PrePost

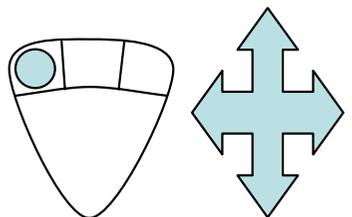
Utilisation de LS-PrePost comme Pre/Post-Processueur

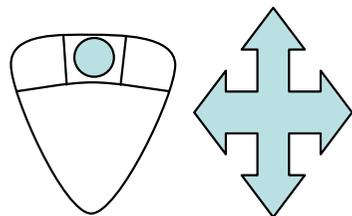
LS-PrePost

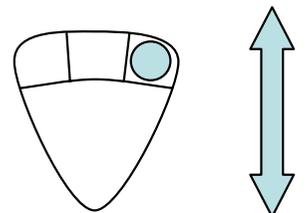


LS-PrePost

Manipulation des vues

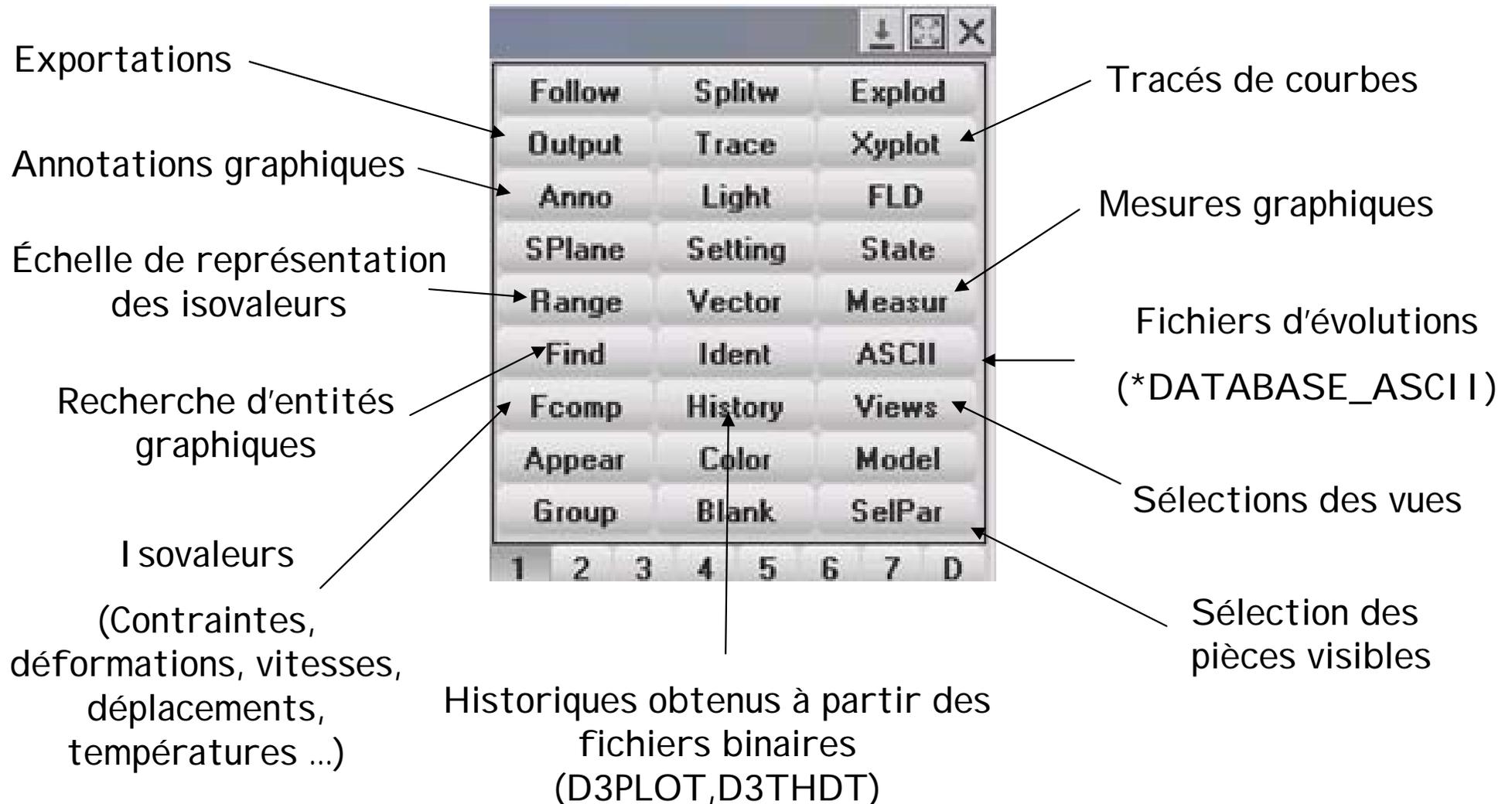
Ctrl +  : Rotation 3D

Ctrl +  : Déplacement panoramique

Ctrl +  : Zoom +/-

Title	Legd	Tims	Triad	Bcolr	Mcolr	Frin	Isos	Lcon	Acen	Zin	+10	Rx	DeOfI	DeOn	Top	Front	Right	Redw	Home
Hide	Shad	View	Wire	Feat	Edge	Grid	Mesh	Shrn	Pcen	Zout	//	Clp	All	Rpart	Bottm	Back	Left	Anim	Reset

LS-PrePost : Fenêtre de Post-traitement



LS-PrePost : Fringe Components

Contraintes (tenseur et invariants)

Vitesses, Déplacements

Efforts généralisés

Déformations

Divers (T, épaisseur...)

Déformations HPP

Déformations Green-Lagrange

Déformations Almansi

Vitesses de déformations

Résidus (erreurs)

Courbes limites de formage

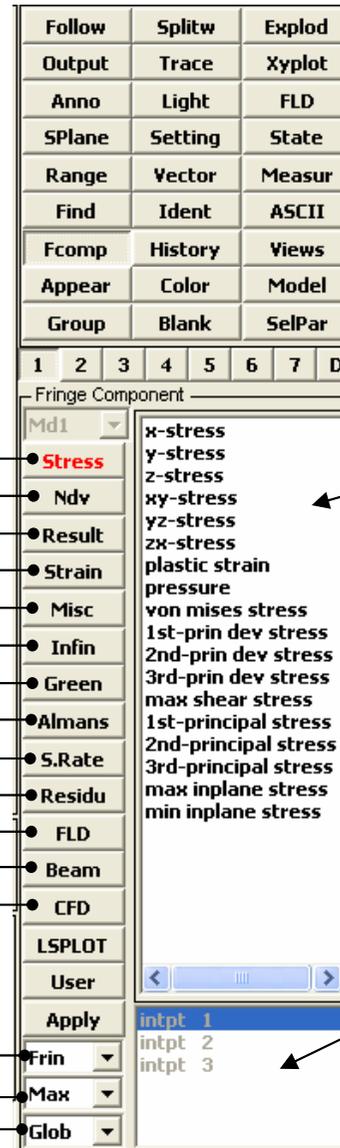
Variables associées aux poutres

Mécanique des fluides

Type de représentation

Critères de représentation

Base de représentation



Choix des composantes

Choix du point d'intégration

LS-PrePost : Mise en données (Pre)

- Il est possible de mettre complètement en données les problèmes à l'aide de LS-PREPOST
- Pour cela, il est nécessaire de basculer vers les interfaces de mise en données
- On peut aussi se créer des interfaces utilisateurs de mise en données (utile lorsque l'on doit toujours faire le même genre de mise en données)

CFD	Cgat	Stereo					
Binout	Skid	AleMat					
Subsys	PTravel	PTrim					
Renum	Refchk	MatDB					
ElGen	Detach	Clipp					
ElEdit	Curves	Offset					
Movcpy	DupNod	Normals					
Trnsfrm	Reflect	Project					
Translt	Rotate	Scale					
1	2	3	4	5	6	7	D

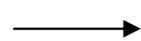
Évolutions (Post-traitement)
et Modifications d'entités
(maillages)

Mots clés pour la mise
en données (1/2)

*Airbag	*Dbase	*Mat					
*Ale	*Define	*Node					
*Boundry	*Elem	*Param					
*Cnstrnd	*Eos	*Part					
*Compnt	*Hrglass	*Rgdwal					
*Contact	*Initial	*Section					
*Control	*Intgrtn	*Set					
*Def2Rg	*Intrfac	*Termnt					
*Damping	*Load	*User					
1	2	3	4	5	6	7	D

LS-PrePost : Mise en données (Pre)

*Include								KSearch
*Title								
*Rail								
*Trans								
								Macro
1	2	3	4	5	6	7	D	



Mots clés pour la mise en données (2/2) et création de Macros-utilisateur

ABFold	DmyPos	BeltFit					
IniPene	LoadPt	Guide					
DampPt	TiedNF	BinderW					
XSect	Vector	DrawB					
IniVel	Accels	DBHist					
SpWeld	Spc	Wall					
Box	Rivet	GWeld					
Coord	Constn	CNRB					
SetD	PartD	MassD					
1	2	3	4	5	6	7	D

Création d'entités et/ou d'ensembles



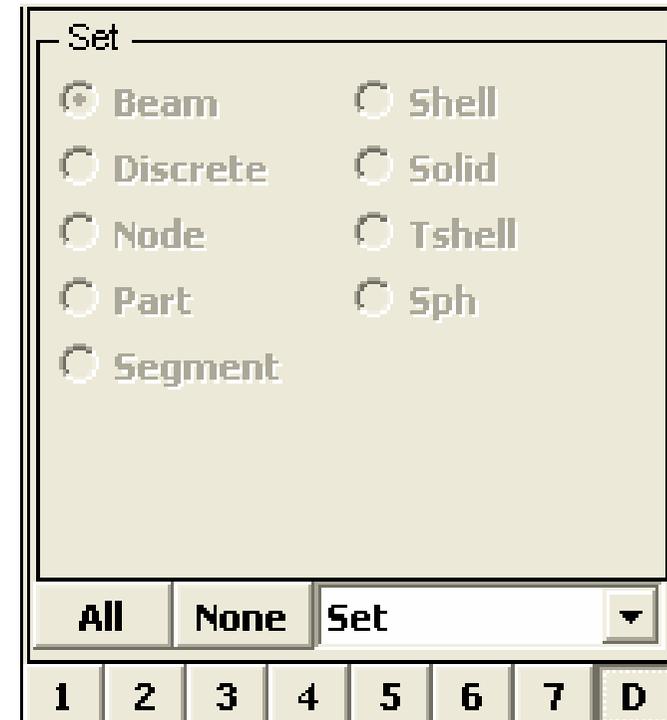
Outils de manipulations élaborées (pliage d'un modèle d'airbag ABFold, positionnement de mannequins...)

LS-PrePost : Mise en données (Pre)

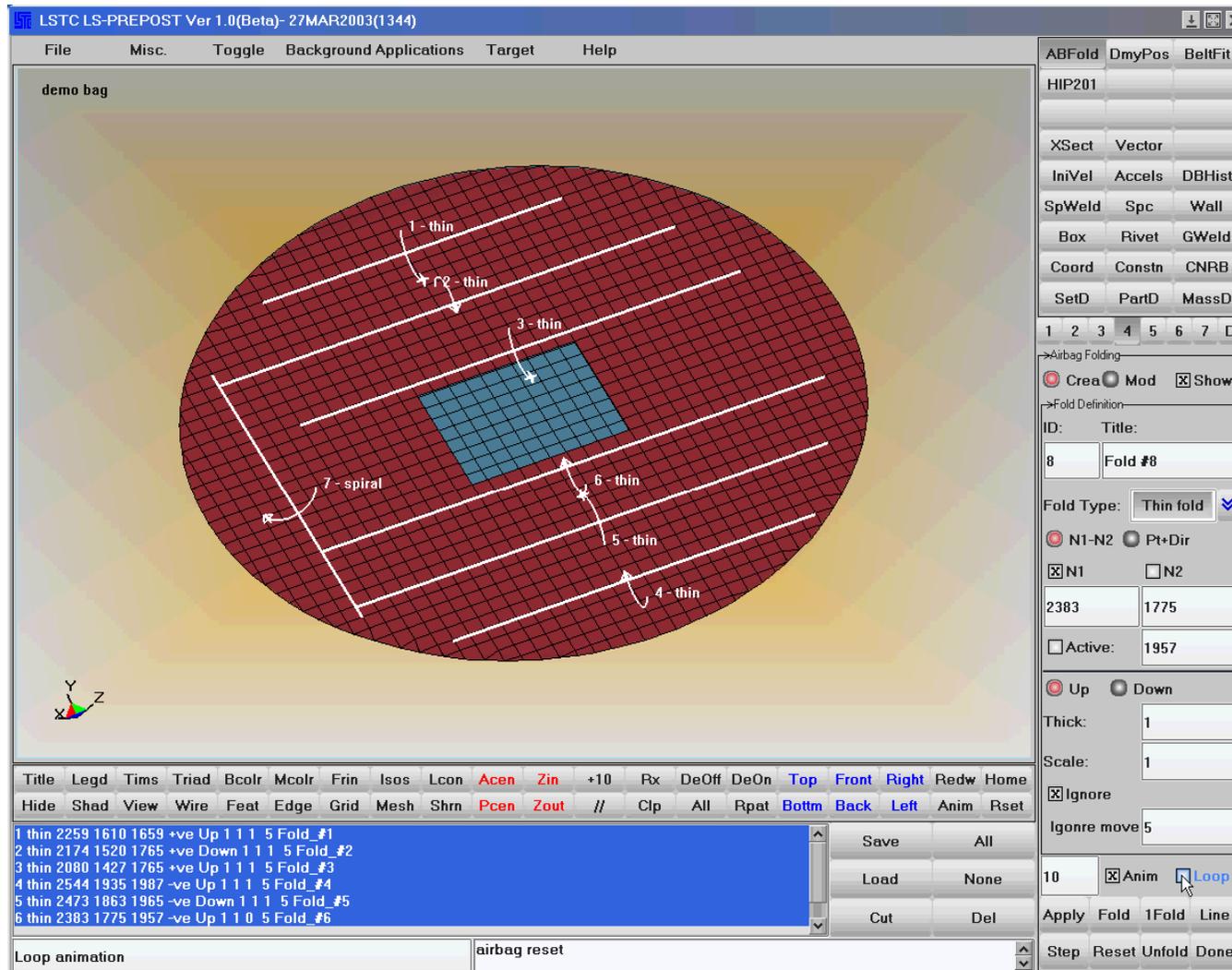
Mesh	ShowG	IcemHex
SphGen	SWGen	BlockM
SurMesh		
2Dmesh	BMesh	
TetMesh		
Curves	Surface	ChainM
		DieLine
HIP201	SQual	PeneCk
IIHS		IGES

→ Outils de création/importation de géométries
Mailleurs (2D, Coques, 3D)

Outils de visualisations/vérifications de la mise en données



LS-PrePost : Mise en données (Pre)



Comment lancer des calculs au LMARC/ENSMM ?

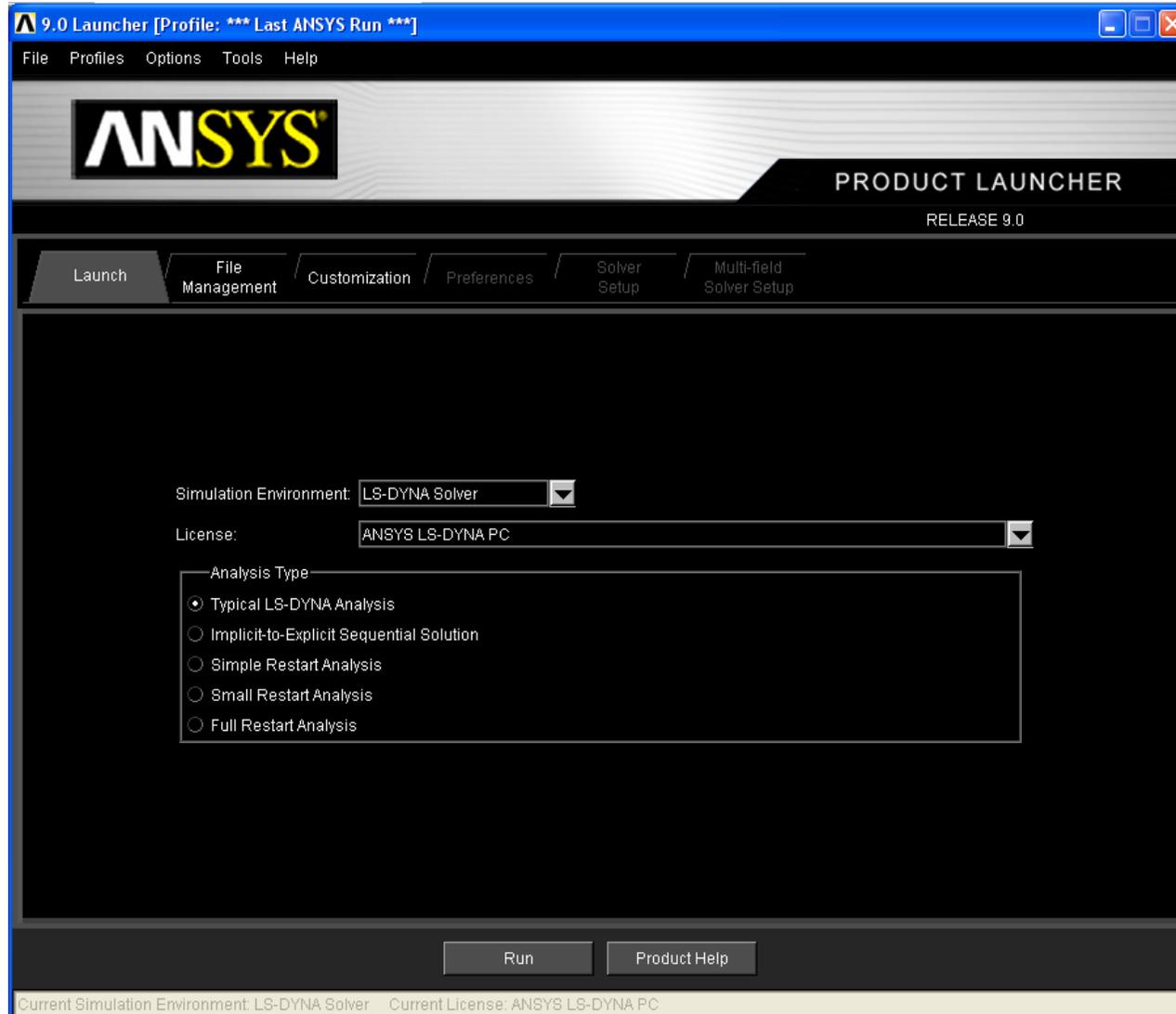
Comment lancer des calculs
au LMARC/ENSMM ?

Version monoposte : ANSYS/LS-DYNA

- La mise en données peut aussi être menée à l'aide de l'interface graphique de ANSYS par utilisation du module ANSYS/LS-DYNA (pour les adeptes ...)
- Dans le cas où l'on réalise la mise en données ailleurs (pour le LMARC : ANSYS, I deas ou à la main ...), il est possible de lancer des calculs par utilisation de l'interface de ANSYS

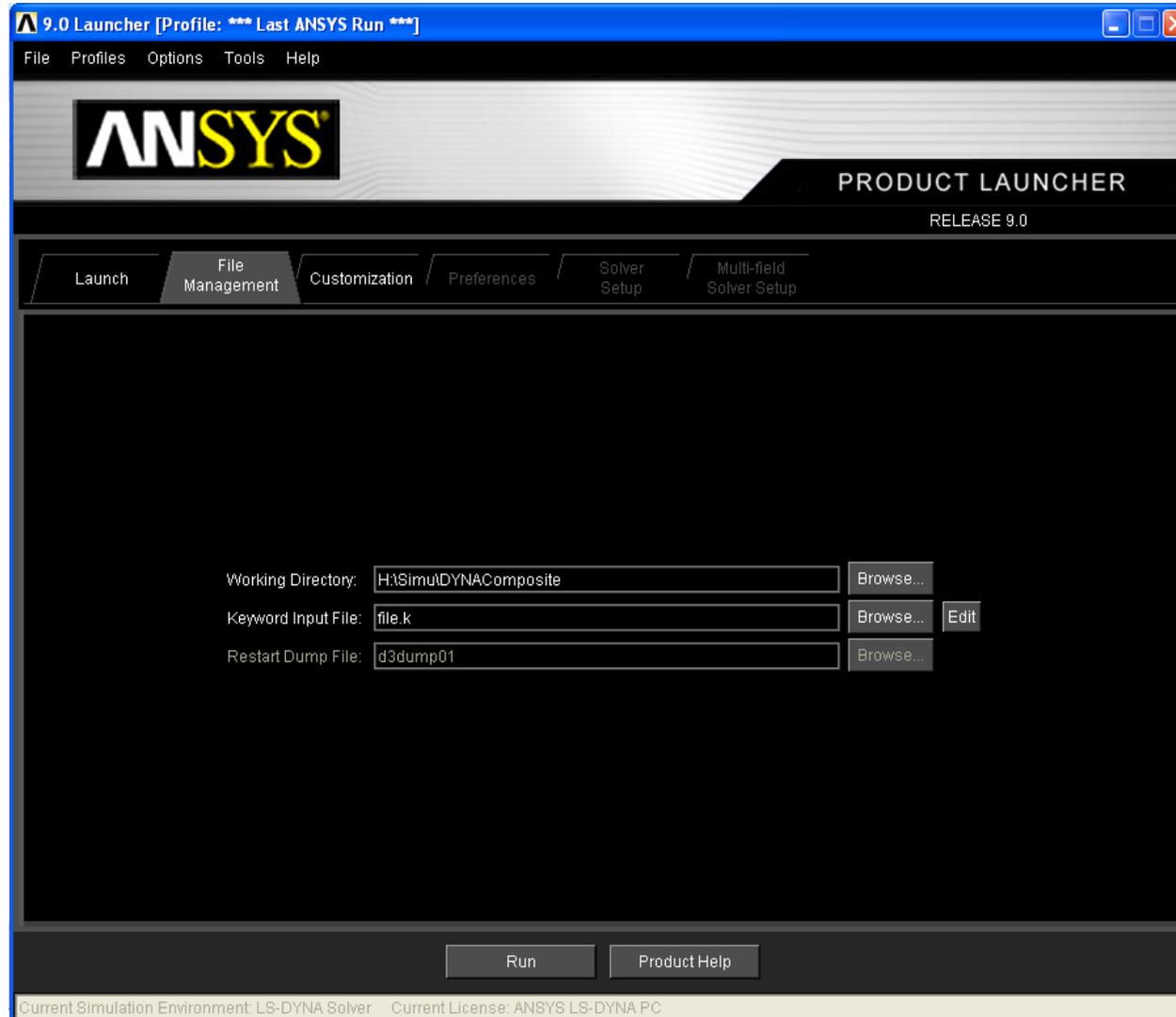
Version monoposte : ANSYS/LS-DYNA

- Pour cela, il faut lancer dans le menu démarrer->ANSYS x.x->Ansys Product Launcher



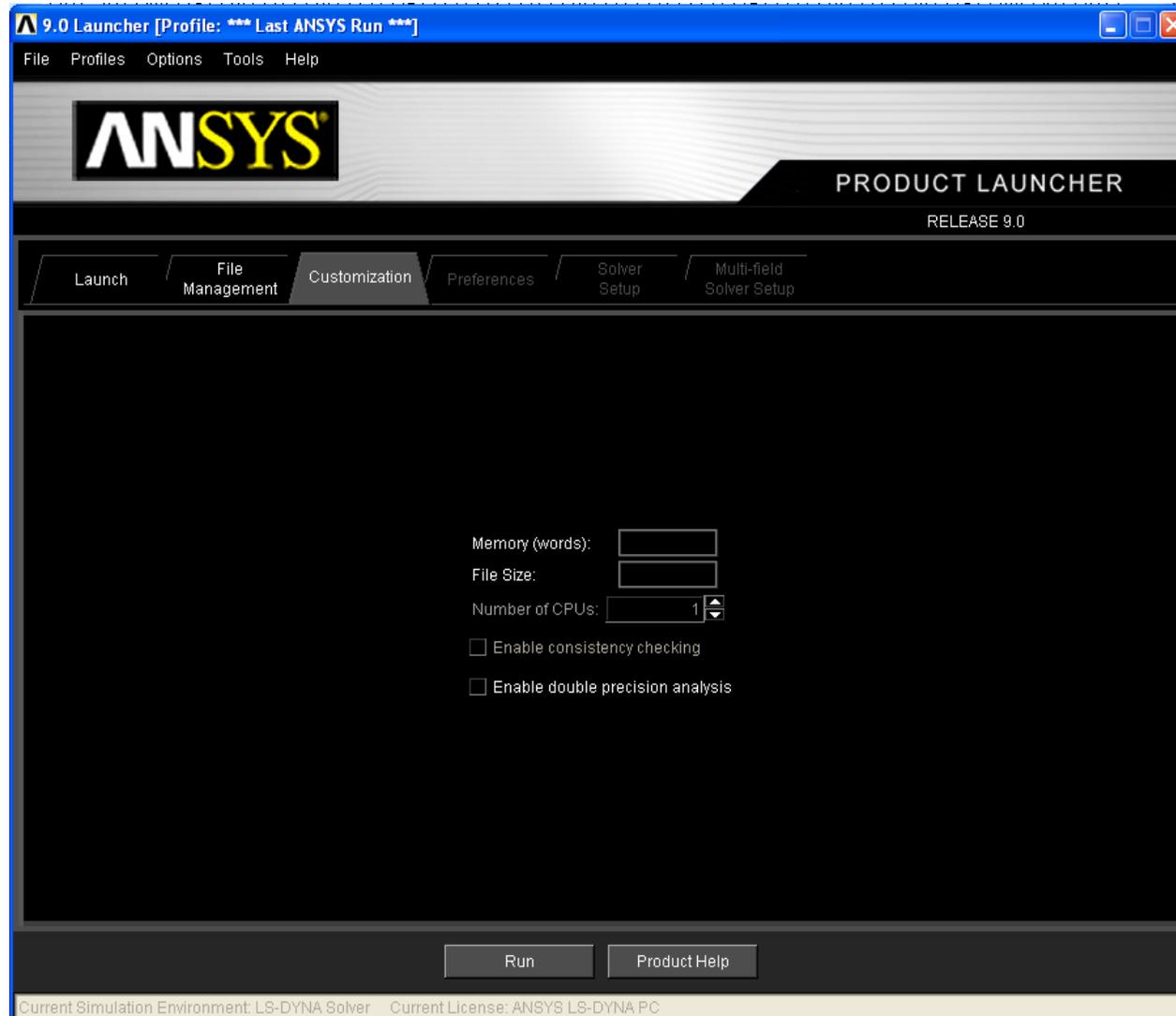
Version monoposte : ANSYS/LS-DYNA

- On choisit le répertoire de travail et le fichier de données dans *File Management*



Version monoposte : ANSYS/LS-DYNA

- On peut affiner les paramètres dans *Customization*



Version monoposte : LS-DYNA sous Linux

- Il existe deux versions de LS-DYNA sous Linux au laboratoire
- Une version parallèle MPP (10 processeurs) sur le cluster Linux de l'équipe M2F
- Une version parallèle MPP (32 processeurs) sur le cluster de l'université
- Il est néanmoins possible d'utiliser une version mono-processeur sur ces deux clusters avec les licences MPP
- La version mono-processeur est en fait une version compilée des sources de LS-DYNA
- Pour toutes informations sur cette version, me demander les sources et le compilateur (Intel Fortran Compiler) ou une version compilée

Version Parallèle : LS-DYNA sous Linux

- Il existe donc deux licences parallèles pour deux clusters distincts
- Cette version permet de mettre en œuvre des gros calculs pour un gain de temps important
- Exemple : crash d'un composant automobile (500000 éléments)
- Sur version monoprocesseurs : 12 Jours
- Sur version parallèle avec 8 processeurs : moins de 48 heures
- Néanmoins, la mise en œuvre peut être compliquée pour certains
- Fonctionne très bien sur le cluster M2F
- Des problèmes en cours de résolution sur le cluster de l'université

Méthodes de résolutions

Approches et algorithmes
de résolutions pour la simulations des
phénomènes linéaires et non-linéaires

-

Utilisations et applications

Simulations par la méthode des éléments finis

➤ Description Lagrangienne et Lagrangienne réactualisée

- La description lagrangienne nécessite la connaissance d'une configuration de référence
- Elle est bien adaptée à l'étude de nombreux problèmes de mécanique des solides pour lesquels on connaît la configuration initiale du système
- Les variables de Lagrange sont attachées à la matière, elles suivent le mouvement de la géométrie
- Exemple du tour de France :
 - Un coureur cycliste se trouvant sur son vélo le fait avancer (avec des moyens plus ou moins légaux) en pédalant, il est donc associé à son vélo
 - Du point de vue du coureur, celui-ci est dans une configuration lagrangienne car il suit l'évolution géométrique de son vélo
- Du point de vue numérique, on utilise aussi le concept de description lagrangienne réactualisée

On considère que la configuration précédente est la nouvelle configuration initiale

Simulations par la méthode des éléments finis

➤ Avantages et inconvénients de l'approche lagrangienne

- Le maillage se déforme en suivant la configuration
- C'est typiquement la notion de déformation introduite en mécanique des milieux continus (exceptés les fluides)
- D'importantes distorsions de maillages amènent irrémédiablement à des problèmes numériques (incohérences des résultats voir pas de résultats...)
- En mécanique des fluides, cette approche n'est pas valable
- En effet, reprenons l'exemple du tour de France mais dans une position bien plus confortable : celle du spectateur
- Celui-ci se moque éperdument de la position initiale du coureur qui passe devant lui ,
- De la même manière, il se moque aussi de son sort une fois qu'il a passé la ligne d'arrivée,
- Ce qui l'intéresse c'est ce qu'il voit passer devant lui ...
- Cette notion est associée aux variables d'Euler

Simulations par la méthode des éléments finis

➤ Description Eulérienne

- le maillage ne se déforme pas (la matière s'écoule à travers le maillage)
- Les informations sont données dans une configuration fixe initiale

On suit les vitesses des particules à travers le maillage fixe

- Cette approche est la plus utilisée en mécanique des fluides et en thermique
- Le maillage étant fixe, la configuration ne peut évoluer pendant le temps (représentation des volumes de contrôle en mécanique des fluides afin de vérifier la conservation de la masse).
- Avantages : adaptée à la mécanique des fluides, pas de problèmes de distorsion du maillage,
- Exemples : écoulements, transfert de chaleur, aérodynamique ...

Comment simuler des phénomènes d'écoulement d'un fluide dans un milieu qui se déforme ?

Simulations par la méthode des éléments finis

➤ Description Arbitraire Lagrangienne Eulérienne (ALE)

- Cette approche permet en théorie de s'absoudre des lacunes des approches lagrangiennes et eulériennes
- Le maillage n'est ni attaché à la matière (Lagrange) ni lié à l'espace (Euler) , le maillage peut alors avoir un mouvement arbitraire
- La description ALE représente donc une généralisation des descriptions purement Lagrangienne et Eulérienne du mouvement.
- On ne fixe plus l'attention sur des points matériels comme dans le cas Lagrangien ou sur des points géométriques fixes comme dans le cas Eulérien, mais sur ce que l'on appelle des points de référence ayant un mouvement arbitraire indépendant du mouvement des points matériels
- On peut alors simuler le comportement de fluides dans des corps déformables ou en mouvement
- Avantage : adaptée au couplage fluide-structure
- Désavantages : cette méthode est un peu difficile du point de vue conceptuel et la mise en œuvre peut être difficile (ou pas)...

Méthodes des éléments finis

Présentation de la
méthode des éléments finis
-
Démarche suivie en mécanique
et en thermique

La méthode des éléments finis

- Pour alléger les développement, on propose de s'absoudre du signe vectoriel
- La méthode des éléments finis consiste à discrétiser des géométries complexes par des formes géométriques simples
- Ces formes sont souvent des droites (ou des arcs) en 1D, des triangles ou des quadrangles en 2D/3D, et des tétraèdres, hexaèdres ... en 3D
- On va alors résoudre les équations de la physique soit localement (un élément après l'autre), soit globalement sur l'intégralité des éléments
- On ne fait ici qu'une présentation de la méthode et surtout de la discrétisation des équations locales par la méthode EF
- Pour plus de renseignements, on peut citer les livres références de Zienkiewicz et al., Dhatt et Touzot, Belytschko et al., Batoz et Dhatt, Bathe ...
- On présente alors la méthode générale de discrétisation

La méthode des éléments finis

- Du point de vue mathématiques, la méthode des éléments finis repose sur des bases qui peuvent apparaître complexes
- Du point de vue ingénierie, elle est assez simple de compréhension
- Du point de vue pratique, cette méthode s'appuie sur le fait que l'on ne peut pas résoudre analytiquement les équations différentielles liées à la physique dans le cas de géométries complexes et/ou de conditions aux limites fortement non-linéaires
- Le principe de la méthode consiste à résoudre les problèmes de manière discrète en résolvant ces équations différentielles sur des géométries simples (1D, 2D ou 3D)
- Pour cela, on doit discrétiser les équations locales
- Cette opération se fait par utilisation de la formulation faible du problème de base (Principe des Travaux Virtuels en mécanique)

La méthode des éléments finis

- Exemple en mécanique : l'équation locale de la conservation de la quantité de mouvement s'écrit

$$\left\{ \begin{array}{l} \operatorname{div} \underline{\sigma} + \rho f = \rho \gamma \text{ sur } \Omega \\ \underline{\sigma} \cdot n = \bar{t} \text{ sur } \Gamma_t \\ u = \bar{u} \text{ sur } \Gamma_u \end{array} \right.$$

- On multiplie alors par une fonction test η (qui est un vecteur ici)
- Cette fonction possède la propriété d'être cinématiquement admissible à 0
- Ce qui traduit le fait que sur la frontière aux déplacements imposés, la fonction test est identiquement nulle (on ne peut pas appliquer 2 conditions différentes)
- Dans le cas du théorème des puissances virtuelles, on la note δv
- Dans le cas du théorème des travaux virtuels, on la note δu

La méthode des éléments finis

- Par intégration sur le domaine, il vient

$$\int \operatorname{div} \underline{\underline{\sigma}} \eta \, dV + \int \rho f \eta \, dV = \int \rho \gamma \eta \, dV$$

- Par utilisation du théorème de la divergence (Green ou intégration par partie)

$$\int \operatorname{div} \underline{\underline{\sigma}} \eta \, dV = \oint \underline{\underline{\sigma}} n \eta \, dS - \int \underline{\underline{\sigma}} : \underline{\underline{\nabla}} \eta \, dV$$

- Par utilisation des conditions aux limites et que la fonction test est CA à 0 sur Γ_u

$$\oint \underline{\underline{\sigma}} n \eta \, dS = \oint_{\Gamma_t} \underline{\underline{\sigma}} n \eta \, dS + \oint_{\Gamma_u} \underline{\underline{\sigma}} n \eta \, dS = \oint_{\Gamma_t} \bar{t} \eta \, dS$$

- Il vient alors la formulation faible du problème initial

$$\oint \bar{t} \eta \, dS - \int \underline{\underline{\sigma}} : \underline{\underline{\nabla}}^S \eta + \int \rho f \eta \, dV = \int \rho \gamma \eta \, dV \quad \forall \eta \text{ CA}$$

La méthode des éléments finis

- Le problème consiste alors à discrétiser l'équation

$$\oint \bar{t} \eta \, dS - \int \underline{\sigma} : \underline{\nabla}^S \eta + \int \rho f \eta \, dV = \int \rho \gamma \eta \, dV \quad \forall \eta \in CA$$

- Il existe plusieurs propositions, la plus courante est la méthode de Galerkin
- D'autres possibilités : collocations, résidus pondérés ...
- Cette méthode consiste à dire que le champ déplacement réel et virtuel sont interpolés de la même manière par une fonction polynomiale

$$\{u\} = [N(x)] \{u^e(t)\} \quad \{\eta\} = [N(x)] \{\eta^e(t)\}$$

- Où $\{u^e\}$ représente le vecteur des déplacements nodaux
- Et $[N]$ la matrice d'interpolation des déplacements, elle dépend du type d'élément fini choisi et possède les propriétés suivantes

$$N_i(x_j) = \delta_{ij}$$

Les fonctions d'interpolations N_i sont égales à 1 pour le nœud i et nulles pour les autres nœuds

La méthode des éléments finis

- De plus le tenseur des contraintes est relié au tenseur des déformations par la matrice de comportement, soit en notation matricielle

$$\underline{\sigma} = \underline{\underline{C}} : \underline{\varepsilon} \rightarrow \{\sigma\} = [C]\{\varepsilon\}$$

- Or par définition le tenseur des déformations est donné par la partie symétrique du gradient du déplacement

$$\{\varepsilon\} = [\nabla^s N]\{u^e\} = [B]\{u^e\}$$

- Il vient par introduction de toutes ces considérations et pour un élément fini

$${}^T \{\eta^e\} \int^T [B][C][B] dV \{u^e\} + {}^T \{\eta^e\} \int \rho^T [N][N] dV \{\ddot{u}^e\} - {}^T \{\eta^e\} \int \rho^T [N]\{f\} dV - {}^T \{\eta^e\} \int^T [N]\{\bar{t}\} dS = 0$$

- Cette solution est vraie quelque soit la fonction test (tant qu'elle reste CA à 0)

$$[M^e]\{\ddot{u}^e\} + [K^e]\{u^e\} = \{F_{ext}^e\}$$

- On obtient ainsi une équation discrète (Système Masse+Ressort généralisé)

La méthode des éléments finis

- Le système global consiste alors à assembler toutes les matrices élémentaires et on obtient le système différentiel du second ordre suivant

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{F_{ext}\}$$

- La résolution numérique par la méthode des éléments finis consiste donc à résoudre un système matriciel différentiel
- Dans le cas où les termes inertiels sont négligeables, le système se résume à

$$[K]\{u\} = \{F_{ext}\} \Leftrightarrow \{F_{int}\} = \{F_{ext}\}$$

- Équilibre statique de la structure
- Il s'agit alors d'un système matriciel linéaire (ou non-linéaire)

La méthode des éléments finis

- Exemple en thermique : l'équation de la chaleur s'écrit localement

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} + v \nabla T = \nabla k \nabla T + \dot{q} \text{ sur } \Omega \\ -k \nabla T = q_s \text{ sur } \Gamma_\phi \\ T = \bar{T} \text{ sur } \Gamma_T \end{array} \right.$$

- Pour simplifier, considérons qu'il n'y ai pas d'advection

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla k \nabla T + \dot{q} \text{ sur } \Omega \\ -k \nabla T = q_s \text{ sur } \Gamma_\phi \\ T = \bar{T} \text{ sur } \Gamma_T \end{array} \right.$$

- Par application de la méthode, multiplions par une fonction test (thermiquement admissible à 0 sur la frontière des températures imposées) et intégrons sur le domaine

$$\int \rho c \dot{T} \eta \, dV = \int \nabla k \nabla T \eta \, dV + \int \dot{q} \, dV$$

La méthode des éléments finis

- Par utilisation du théorème de la divergence (dans le sens volume -> surface)

$$\int \nabla k \nabla T \eta \, dV = \oint k \nabla T \eta \, dS - \int \nabla \eta k \nabla T \, dV$$

- Or, par applications des conditions aux limites en flux imposée et de la condition que la fonction test soit thermiquement admissible à 0 sur Γ_T

$$\int \nabla k \nabla T \eta \, dV = - \oint_{\Gamma_\phi} q_s \eta \, dS - \int \nabla \eta k \nabla T \, dV$$

- Il vient la formulation faible associée à l'équation de la chaleur

$$\int \rho c \dot{T} \eta \, dV + \int \nabla \eta k \nabla T \, dV - \oint q_s \eta \, dS + \int \dot{q} \eta \, dV = 0 \quad \forall \eta \text{ TA}$$

- Par utilisation de la méthode de Galerkin, on obtient alors le système matriciel différentiel suivant

$$[M] \{\dot{T}\} + [K] \{T\} + [K_q] \{T\} = \{Q\}$$

- Dans le cas d'un régime permanent, on doit résoudre un système matriciel linéaire (ou non-linéaire)

Autres méthodes

Méthodes sans maillages
(Meshless / Particulaires)
Volumes finis

Simulations avec des méthodes sans maillages - Meshless

➤ Approche SPH (Smooth Particles Hydrodynamics)

- Méthode employée en astronomie et cosmologie
- Basé sur la notion de partition de l'unité (Fonctions d'interpolations de Babūška)
- Méthodes sans maillages : pas de notions de connectivités (1 nœud = 1 particule)
- Permet de s'absoudre de la distorsion des maillages, d'opérations de séparation de maillages.
- Permet de simuler : fissuration, ingestion de volailles dans une turbine, impacts à très grandes vitesses, particules de fluides ...
- Méthodes coûteuses à mettre en œuvre : les matrices à inverser sont pleines et peuvent être non-symétriques
- Intéressant pour des fortes distorsions ou couplage fluide/structure

➤ Approche EFG (Element Free Galerkin)

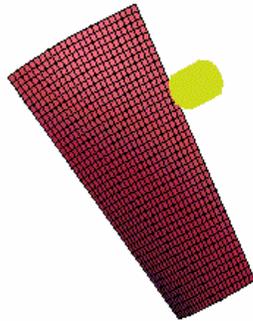
- Basée sur la méthode MLSA (Belytschko et al.)

Possibilités de coupler méthodes EF et approches meshless

Couplage des méthodes EF et Meshless (1)

➤ Intérêts

BIRD IMPACT
Time = 0



Ingestion de volailles

l'oiseau est découpé en plusieurs parties (approche SPH) et la turbine est en TA6V (méthode EF)

IMPACT 6.18 KM/S ALU/ALU
Time = 0



Impact à très grande vitesse

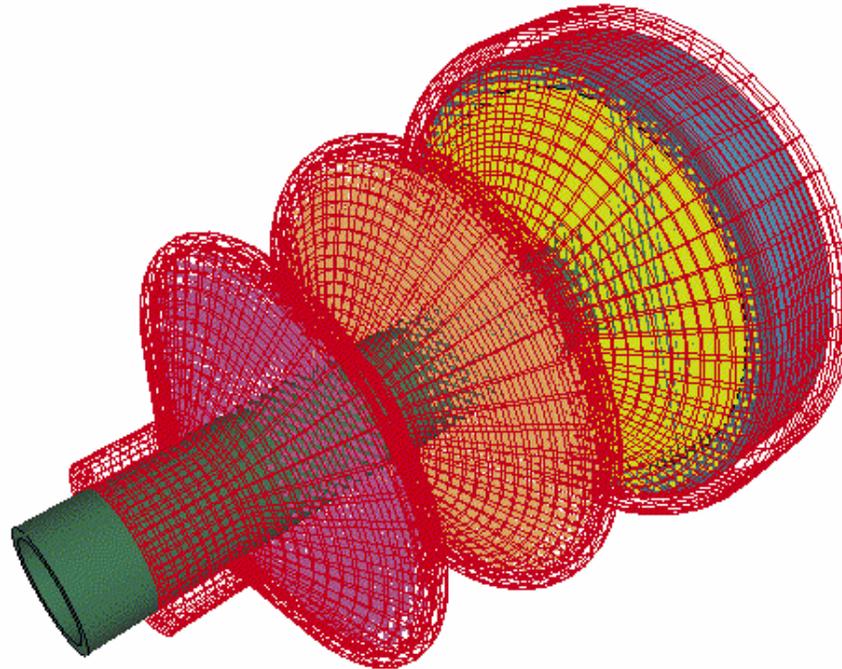
le projectile fait exploser une plaque en A2007 ($v=6.18$ km/s)

Couplage des méthodes EF et Meshless (2)

➤ Intérêts

Comportement de la graisse dans un soufflet d'essieu automobile en fonctionnement

SPIN TEST RUBBER BOOT
Time = 0



Le couplage de ces deux méthodes permet de ne pas se fixer de limites dans la prédiction

Exemples de mise en données

Exemples de mise en données

-

Mécanique

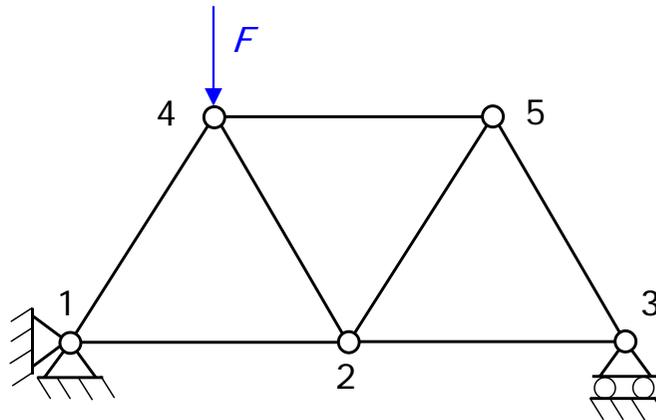
Thermique

Mécanique des fluides

Exemples en mécanique

➤ Pour ne pas s'endormir, faisons quelques exemples de mise en données

- Problème de mécanique
- Soit la modélisation d'un système à barre (treillis) suivant
- On veut connaître les efforts et contraintes transmis dans le système dans le cas de ce système



E (MPa)	ρ (kg/m ³)	ν	L Barre (m)	S barre (cm ²)	F (N)
210000	7800.	0.3	1	25	0,5.10 ⁶

Exemples en mécanique

- Mis en œuvre dans LS-DYNA
 - Ouvrir un fichier texte à l'aide du Bloc-Notes
 - Mettre complètement en données le problème mécanique
 - Voir les résultats avec LS-Prepost

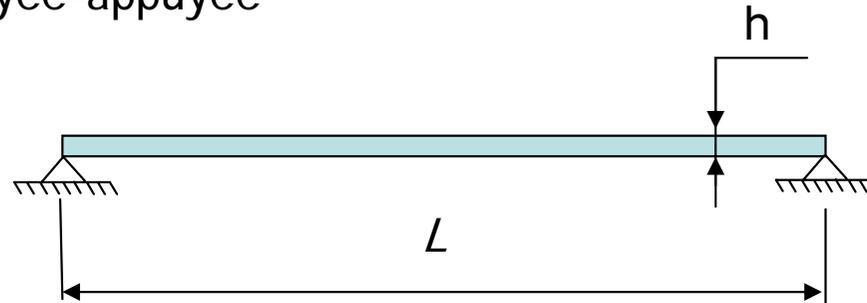
Exemples en mécanique : analyse modale

➤ Calcul des 10 premiers modes propres d'une poutre appuyée-appuyée

- Soit une poutre appuyée-appuyée

$$E=210000 \text{ MPa}$$

$$\rho=7800 \text{ kg.m}^{-3}$$



$$b=10 \text{ mm}$$

$$h=2 \text{ mm}$$

$$L= 100 \text{ mm}$$

- La théorie des poutres (Bernoulli) donne l'expression suivante pour les pulsations propres

$$\omega_n = n^2 \pi^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho SL^4}}$$

- Les modes propres (déformées propres) sont obtenus par

$$y_n(x) = \sin \frac{n\pi x}{L}$$

Exemples en mécanique : analyse modale

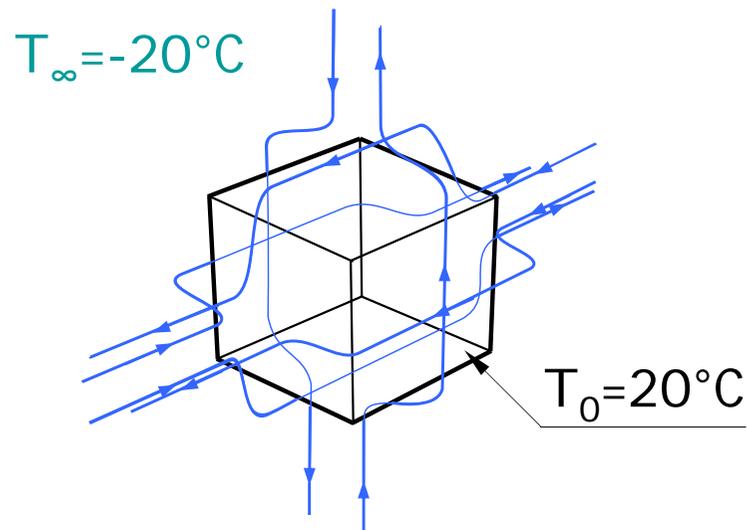
➤ Mise en œuvre avec LS-DYNA

- Mettre en données le problème avec LS-DYNA
- Retrouver les valeurs des pulsations propres et des modes propres associés
- Pour cela, utiliser LS-Prepost

Exemples en thermique

➤ Refroidissement d'un cube d'eau

- Posons un cube d'eau de température initiale à 20°C dans une chambre froide portée à -20°C
- Le cube est refroidi par convection sur ces six faces (hypothèse importante !!!).
- Combien de temps faut-il pour que le cube d'eau se transforme en cube de glace ?



Paramètres de calculs

Cube de 0.1 m de côté

Masse volumique : $\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$

Chaleur spécifique : $c = 2000 \text{ J.kg}^{-1}.\text{°C}$

Conductivité thermique : $k = 1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}$

Chaleur latente de solidification : $H_{\lambda} = 300000 \text{ J.kg}^{-1}$

Température de transition liquide \rightarrow solide : $T_{\lambda} = 0^{\circ}\text{C}$

Coefficient de convection : $h = 100 \text{ W.m}^{-2}$

Exemples en thermique

➤ Transformation de phase de type liquide->solide

- Le problème ici tient au fait que l'eau subie une transformation de phase de type liquide-> solide
- Il est donc nécessaire de prendre en compte cette transformation

➤ Résolution analytique

- Temps mis pour passer de 20°C à 0°C
- On utilise l'équation de la chaleur avec pour seule source de chaleur des conditions de convection sur les six faces du carré

$$\rho c \frac{dT}{dt} = -\frac{hA}{V}(T - T_\infty) \quad \longrightarrow \quad \frac{dT}{T - T_\infty} = -\frac{hA}{\rho c V} dt \Rightarrow \ln|T - T_\infty| = -\frac{hA}{\rho c V} t + C$$

$$c = c_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p$$

$$t = 0 \rightarrow T = T_0 \Rightarrow C = \ln|T_0 - T_\infty|$$

$$t = -\frac{\rho c V}{hA} \ln \left| \frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} \right|$$

$$t = 231 \text{ s}$$

Exemples en thermique

➤ Transformation de phase de type liquide->solide

- Il faut maintenant calculer le temps mis pour transformer intégralement l'eau en glace
- Ce phénomène est associé à la chaleur latente opérant pendant la solidification
- Lors de la transformation, il est nécessaire de prendre en compte le phénomène de chaleur latente
- Ce phénomène est associé à l'énergie échangée pendant le changement de phase
- La chaleur sera libérée ultérieurement (latent : qui se manifeste plus tard)
- Ainsi la chaleur latente provoque un changement de phase sans pour autant provoquer un changement de température
- Par utilisation de la définition de la chaleur spécifique et de l'équation de la chaleur

$$\rho \frac{\partial H}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{hA}{V}(T - T_{\infty})$$

- Or la température est constante et par utilisation de la dérivation en chaîne

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial H}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

Exemples en thermique

- L'équation de la chaleur est alors indépendant de la température dès lors que l'on active la transition de phase, il vient

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{hA}{V} (T - T_{\infty})$$

- L'enthalpie libre n'est donc fonction que de la variable temporelle t et par intégration

$$\rho V H = hA (T_{\lambda} - T_{\infty}) t + C$$

- Initialement, aucune chaleur n'est échangée (latente...) donc $C=0$
- On recherche le temps mis pour que toute la chaleur latente soit échangée, il vient

$$t_f = -\frac{\rho V H_{\lambda}}{hA (T_{\lambda} - T_{\infty})}$$

$$t=2500 \text{ s}$$

Exemples en thermique

➤ Refroidissement jusqu'à -20°C

- Le problème différentiel du premier ordre associé au refroidissement introduit un phénomène à saturation
- En principe, il faut un temps infini (!) pour refroidir jusqu'à -20°C
- Du point de vue numérique (mathématique), on va considérer le processus stable lorsque la variation de température sera faible
- On rappelle l'équation régissant le problème

$$t = -\frac{\rho c V}{hA} \ln \left| \frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} \right| \quad T \rightarrow T_{\infty} \Rightarrow t \rightarrow +\infty$$

- Donc pour résoudre approximativement ce problème, calculons le temps mis pour refroidir jusqu'à une température $T = T_{\infty} + \Delta T$, soit

$$t = -\frac{\rho c V}{hA} \ln \left| \frac{\Delta T}{T_0 - T_{\infty}} \right|$$

- Si $\Delta T = 0,1$ °C, alors le temps mis pour refroidir de 0°C à -20°C est de

$$t = 2000 \text{ s}$$

Exemples en thermique

➤ Temps total pour refroidir de -20°C à 20°C

- Il vient donc le temps total (approximatif) pour refroidir le cube

$$t=4730 \text{ s}$$

➤ Vérification avec LS-DYNA

- Ouvrir le fichier de mise en données : phase.k
- Mettre en données les parties enseignées auparavant et attendre pour la suite
- Une fois que la mise en données est correcte et terminée, lancer le calcul avec LS-DYNA
- Comparer les résultats analytiques et numériques par utilisation de LS-PREPOST

Exemples en mécanique des fluides

- Écoulement Laminaire longitudinal entre deux plaques (Couette et Poiseuille)
 - Ces deux exemples très simples (et assez proches) peuvent être résolus analytiquement
 - On considère l'écoulement d'un milieu fluide Newtonien visqueux incompressible
 - La loi de comportement associée à ce type de fluide est donnée par

$$\underline{\sigma} = -p\underline{1} + 2\mu\underline{D}$$

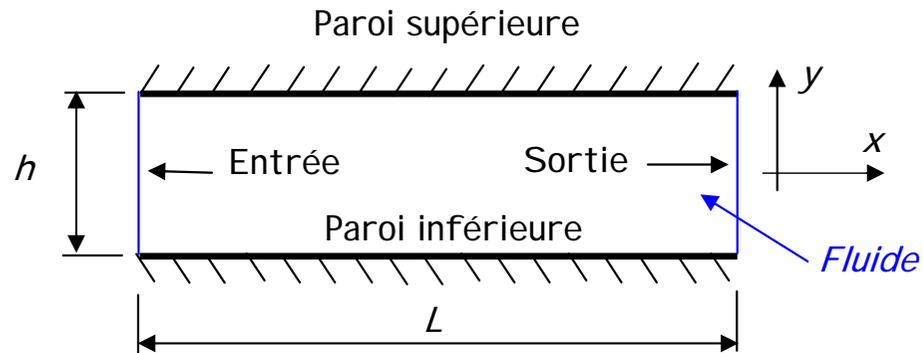
- Les équations de mouvement associées à ce type de fluide sont données par les équations dites de Navier-Stokes (conservation de la quantité de mouvement)

$$\rho \frac{Du}{Dt} = f_v - \nabla p + \mu \nabla^2 v$$

- Appliquons ces équations à nos deux problèmes

Exemples en mécanique des fluides

➤ Écoulement de Poiseuille



- On désire résoudre le problème de l'écoulement laminaire permanent longitudinal d'un fluide visqueux incompressible Newtonien entre deux plaques planes, parallèles, de largeur infinie (très grand devant h)
- D'après les hypothèses le champ des vitesses s'écrit

$$v(x, y, z, t) = \begin{pmatrix} v(y) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Exemples en mécanique des fluides

- Par utilisation des hypothèses, on montre que les équations de Navier-Stokes donnent

$$\frac{dp}{dx} = \mu \frac{d^2 v}{dx^2}$$

- Par intégration de ces équations et par utilisation des conditions aux limites, il vient

$$v(y) = -\frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} y(h-y) \longrightarrow \text{Profil des vitesse parabolique}$$

- Le gradient de pression est donné par

$$\frac{dp}{dx} = \frac{p_2 - p_1}{L}$$

- La vitesse moyenne de l'écoulement est donnée par

$$\bar{v} = \frac{1}{h} \int_0^h v(y) dy = \frac{2}{3} v_{MAX} = -\frac{h^2}{12\mu} \frac{dp}{dx}$$

$$v_{MAX} = 1 \text{ m/s}$$

Exemples en mécanique des fluides

- Afin de vérifier l'hypothèse d'écoulement laminaire, on calcule le nombre de Reynolds

$$Re = \frac{\rho \bar{v} h}{\mu}$$

Re=100

L (m)	h (m)	ρ (kg/m ³)	μ (Pa.s ou Pl)	p_1 (Pa)	p_2 (Pa)
5	1	1	0,01	0,6	0

➤ Comparaison avec LS-DYNA

- Ouvrir le fichier Poiseuille.k
- Modifier et commenter si nécessaire
- Lancer le calcul et vérifier les résultats avec LS-Prepost

Exemples en mécanique des fluides

➤ Problème de Couette

- Le problème de Couette est très proche du problème de Poiseuille
- On considère ici que la plaque supérieure est animée d'une vitesse horizontale de

$$v_0 = 1 \text{ m/s}$$

- Dans ce cas, le champ des vitesses est donné par

$$v(y) = -\frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} y(h-y) + \frac{v_0}{h} y$$

- Le premier terme correspond à un écoulement de Poiseuille et le second est associé à un écoulement à gradient de pression (chute linéique de pression) nulle
- On peut réécrire cette expression sous la forme

$$v(y) = \frac{v_0}{2} \left(\left(1 + \frac{2y}{h} \right) + K \left(1 - \frac{4y^2}{h^2} \right) \right)$$

$$K = -\frac{h^2}{4\mu v_0} \left(\frac{dp}{dx} \right) = -\frac{h^2}{4\mu v_0} \left(\frac{p_2 - p_1}{L} \right)$$

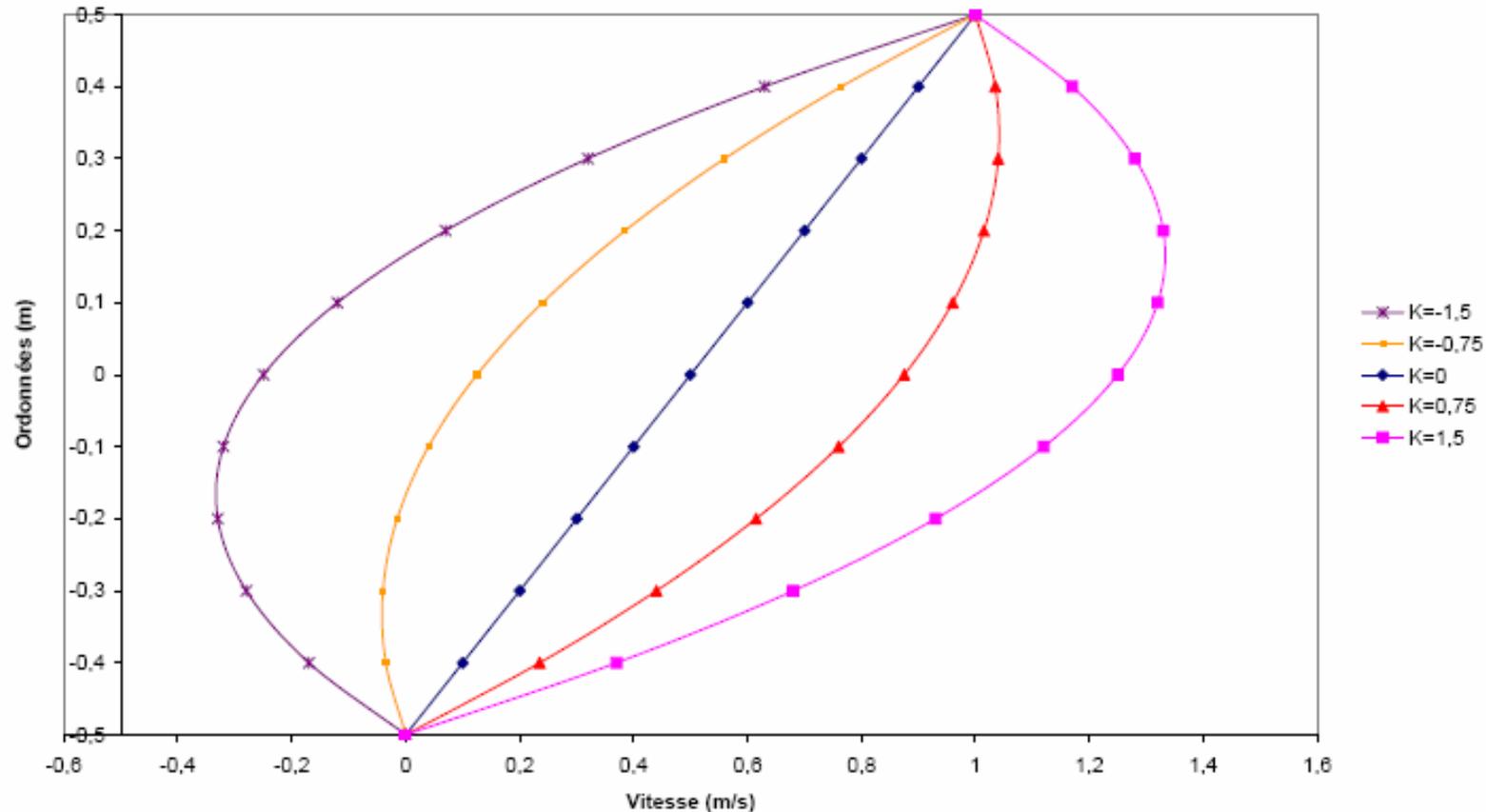
Gradient de pression adimensionnel

Exemples en mécanique des fluides

➤ Problème de Couette

- Donc selon le signe et la valeur de K on peut inverser le sens de l'écoulement

Profil des vitesses en fonction du gradient de pression adimensionnel



Exemples en mécanique des fluides

➤ Mise en œuvre avec LS-DYNA

- Copier et renommer le fichier poiseuille.k en couette.k
- Modifier le fichier pour rendre compte du problème de Couette
- Changer les conditions de pression dans les cas suivants pour faire varier la valeur de la chute linéique de pression adimensionnelle

<i>Simulation N°</i>	<i>L (m)</i>	<i>h (m)</i>	<i>ρ (kg/m³)</i>	<i>μ (Pl)</i>	<i>p_1 (Pa)</i>	<i>p_2 (Pa)</i>
1	5	1	1	0,01	0,3	0
2	5	1	1	0,01	0,3	0,15
3	5	1	1	0,01	0,3	0,3
4	5	1	1	0,01	0,15	0,3
5	5	1	1	0,01	0	0,3

Quant peut-on parler de régime dynamique ?

Quand peut-on parler de régime
dynamique ?

Quant peut-on parler de régime dynamique ?

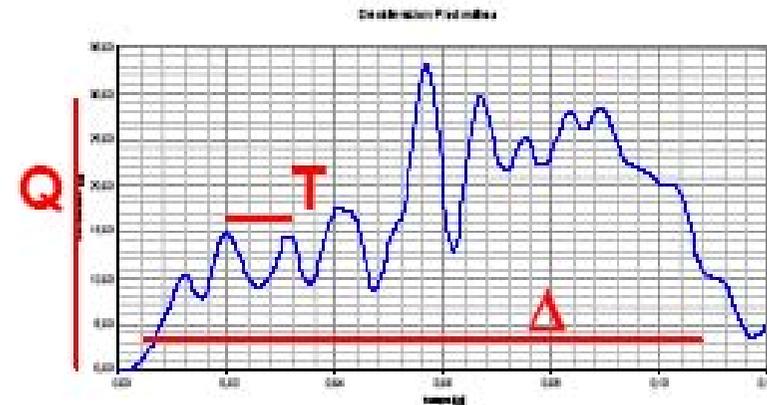
Intuitivement

- Lorsque les effets d'inertie ne peuvent plus être négligés
- L'énergie cinétique mise en jeu n'est plus négligeable vis-à-vis de l'énergie de déformation
- Vibratoire (échange Énergie cinétique – Énergie potentielle)
- Ce régime n'est pas associé à la dynamique transitoire
- Historiquement, LS-DYNA est un code de simulation en dynamique transitoire
- Néanmoins, il est possible d'étudier le comportement vibratoire de structures
- Ainsi que la possibilité de mener des études quasi-statique (LS-NIKE)

Quant peut-on parler de régime dynamique ?

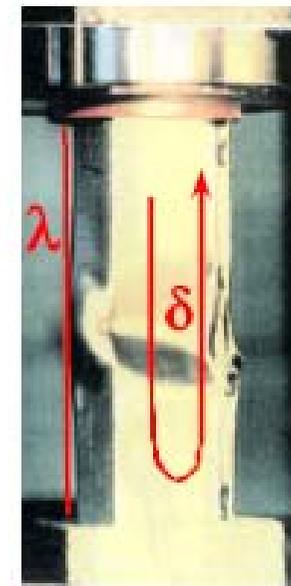
Caractérisation de la sollicitation

- amplitude du chargement Q
- durée du chargement Δ
- façon dont le chargement varie au cours du temps : temps caractéristique T



Caractérisation de la structure

- dimension caractéristique de la structure : λ
resp. hétérogénéité caractéristique du matériau (considéré, à l'échelle d'observation comme une *structure*)
- temps caractéristique de la structure δ :
correspond au temps mis par une impulsion appliquée à la structure pour parcourir une distance de l'ordre de λ (notion d'onde)
- **Q_{max}** une amplitude de chargement admissible pour la structure
 - intégrité de la structure est assurée pour une amplitude inférieure à **Q_{max}**
 - fait référence à un critère de résistance locale, d'endommagement critique, voire de ténacité dans le cas où des notions de mécanique de la rupture sont appliquées



Quant peut-on parler de régime dynamique ?

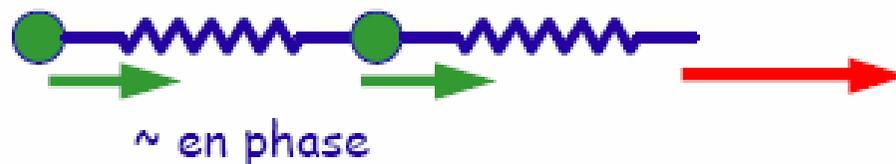
Comparaison des paramètres caractéristiques structure/chargement caractérisation du régime de sollicitation

intensité du chargement

- $Q \ll Q_{max}$: réponse de la structure (généralement) linéaire
- non linéaire pour une amplitude de l'ordre de Q_{max}
- pour avoir $\Delta \gg T$: supposer l'intensité du chargement $Q < Q_{max}$ sinon risque de ruine et incompatibilité avec le fait que la durée de vie de la structure puisse effectivement être de l'ordre de Δ

pour une variation chargement $T >$ temps caractéristique δ

- variation temporelle de la sollicitation est suffisamment lente pour que la structure puisse suivre de façon globale ces variations
- phénomènes de propagation n'ont pas à être pris en compte, même si l'énergie cinétique ne peut pas forcément être négligée
- situation limite = quasi-statique



Quant peut-on parler de régime dynamique ?

lorsque $T < \delta$ ou $T \sim \delta$:

- les effets de propagation doivent être pris en compte
- réponse de la structure est qualifiée de dynamique
- phénomènes de propagation d'ondes prépondérants



- si l'amplitude des sollicitations est faible \rightarrow réponse linéaire
- si chargement périodique \rightarrow réponse vibratoire (suite à réponse transitoire)
- sinon dynamique transitoire (linéaire ou non)

Exemple : choc sur une structure

- phase de mise en charge dont la durée est inférieure au temps δ caractéristique du système
- phase de mise en équilibre durant laquelle le chargement global varie peu : le temps caractéristique associé au chargement devient dans cette phase de l'ordre de Δ et supérieur à δ (ceci n'est évidemment vrai que globalement ; localement, les chargements sont extrêmement instationnaires)
- mise en équilibre de la structure (homogénéisation des champs mécaniques) : nécessite généralement quelques dizaines de δ ; les instants suivants peuvent alors être décrits sans tenir compte de phénomènes de propagation (attention cela ne veut pas dire que les effets d'inerties sont négligeables...)

Quant peut-on parler de régime dynamique ?

Phénomènes thermiques

- phénomènes thermiques induits par le couplage thermomécanique par déformation
- définir un temps caractéristique θ de la diffusion de la chaleur sur une longueur l
- θ court devant la durée d'une sollicitation $Q_S \rightarrow$ supposer le processus isotherme
- dynamique transitoire $\rightarrow \theta$ long devant Δ : hypothèse d'adiabaticité
- entre ces deux cas limites :
 - pour des sollicitations thermiques très violentes (choc laser par exemple),
 - analyse thermomécanique couplée nécessaire

Effets d'échelle

- les échanges de chaleur à *petite échelle* (par exemple à l'échelle de l'hétérogénéité d'une microstructure) peuvent avoir des conséquences localement \rightarrow à quelle échelle peut-on faire l'hypothèse d'adiabaticité ?
- de la même manière, la sollicitation mécanique affecte une longueur caractéristique du matériau $c.T$ qui est à comparer avec les dimensions du VER : lorsque la longueur $c.T$ est inférieure, le couplage avec la microstructure peut être à considérer (apparition de nouveaux mécanismes possibles dans le VER avec pour conséquence une évolution du comportement : p.ex. ondes de choc dans métaux, ? mécanismes plasticité)

Quant peut-on parler de régime dynamique ?

Cas 1 : choc frontal d'un véhicule

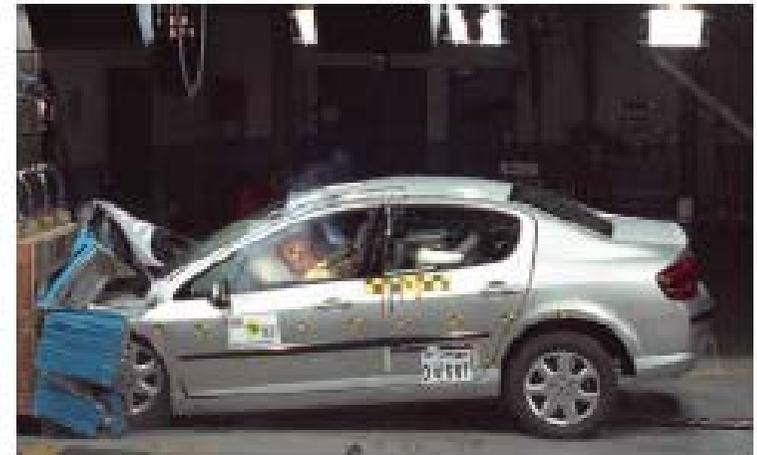
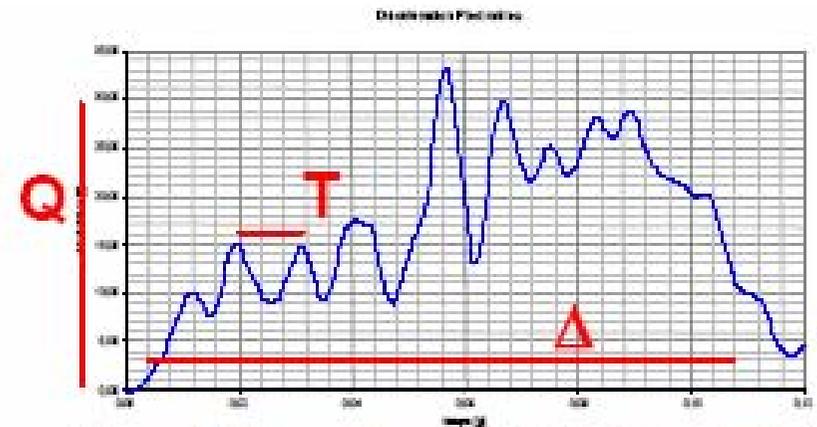
- Vitesse d'impact 65 km/h
- dimension caractéristique λ de l'ordre du mètre, célérité ondes $\sim 5000\text{m/s}$
→ δ caractéristique $\ll 1\text{ ms}$
- durée Δ du choc voisine de 100 ms
- front de montée $T \sim 10\text{ ms}$

Structure

- après impact → mise en équilibre rapide
- fonctionnement localement QS
- effets d'inertie (arr. vh « pousse »...)

Matériaux

- vitesses de déformation: QS → 100s^{-1}
- nécessité de prendre en compte cet effet
- Pressions faibles / comportement déviatorique



Quant peut-on parler de régime dynamique ?

Cas 2 : impact d'un projectile cinétique

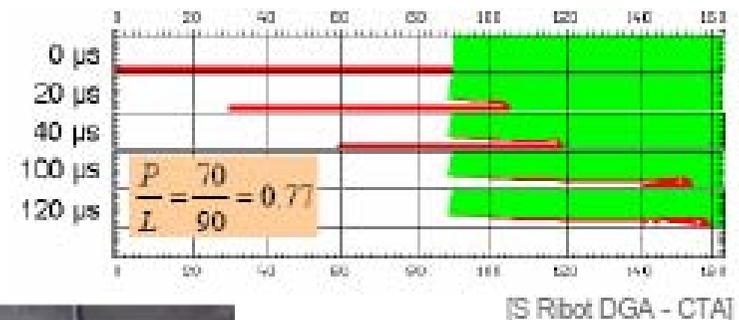
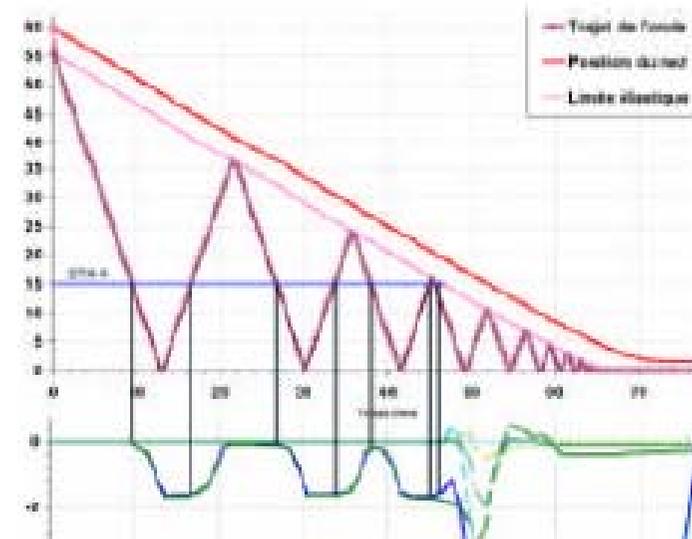
- Vitesse d'impact 1000-4000 m/s
- dimension caractéristique λ de l'ordre de 50 mm
mètre, célérité ondes ~ 5000 m/s
 $\rightarrow \delta$ caractéristique $\sim 10 \mu\text{s}$
- durée Δ du choc voisine de $70 \mu\text{s}$
- front de montée $T \sim 2 \mu\text{s}$

Structure

- n'est jamais en équilibre
- profil des ondes dans le barreau

Matériaux

- vitesses de déformation : jusqu'à 10^5s^{-1}
- Pressions très élevées en tête : comportement hydrodynamique (fluide) \rightarrow adjoindre équation d'état



Quant peut-on parler de régime dynamique ?

Bilan

- Dynamique = dépend des temps caractéristiques relatifs de la structure et de la sollicitation
- La notion de dynamique est relative au comportement de structure
- Les vitesses de déformation peuvent être élevées :
 - Le comportement dépend de la vitesse de déformation (évolution des mécanismes)
 - Par abus : qualifié de comportement « dynamique »
 - Nécessité de caractériser les matériaux à des vitesses et des trajets proches de leur emploi

Quant peut-on parler de régime dynamique ?

Globalement *pour les structures usuellement étudiées* : tout processus de déformation invoquant des vitesses de chargement supérieures à 1s^{-1}

- régime dynamique lent : entre 1 et 10s^{-1}
 - proche du processus quasi-statique
 - techniques expérimentales QS : correspondent aux capacités maximales des moyens d'essais classiques et de leur instrumentation
- régime dynamique moyen : entre 10 et 1000s^{-1}
 - échelle temporelle de l'ordre de la milliseconde
 - phénomènes de crash (propagation au début jusqu'à équilibre rapide)
- régime dynamique rapide : au-delà de 10^4s^{-1}
 - échelle temporelle = microseconde
 - propagation d'ondes mécaniques
 - ondes de choc (pressions et des taux de triaxialité très élevés)
 - impacts balistiques, explosions
- régime hydrodynamique 10^6 à 10^8s^{-1} (matériaux se comportent comme des fluides)
 - temps caractéristique = nanoseconde
 - phénomènes extrêmement violents : impacts de météorite, jet de charge creuse

Comportement
Déviatorique

Comportement
Hydrodynamique

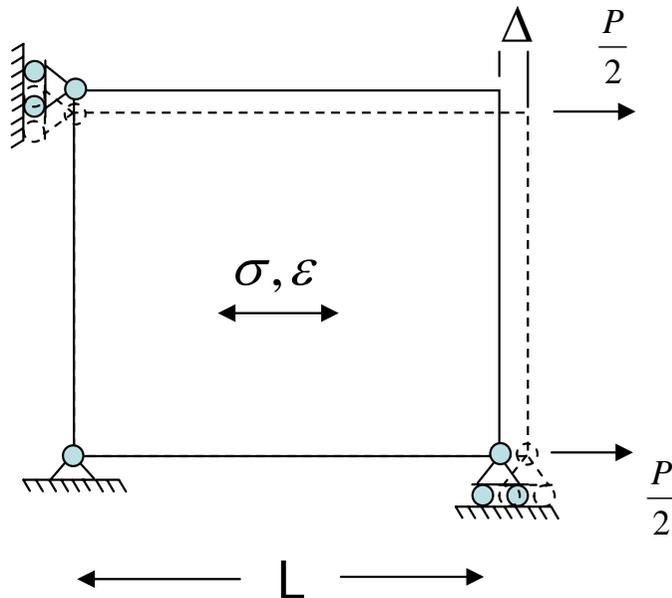
Non-linéarités

Notions de non-linéarités Exemples

Non linéarités en mécanique des milieux continus

➤ Linéarités en mécanique

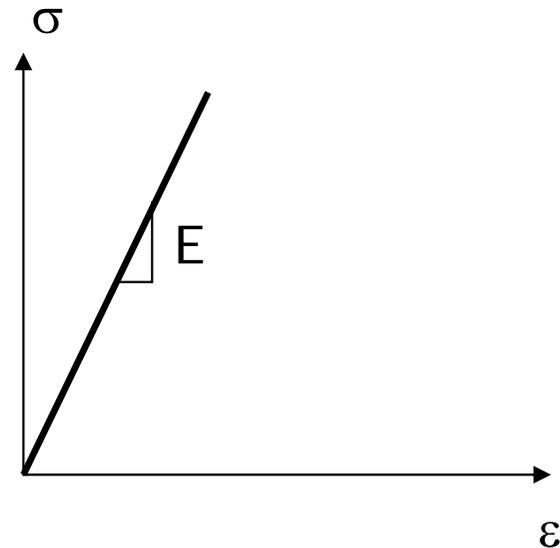
- Linéarité matérielle : comportement linéaire (par ex. élasticité linéaire en hypothèse de petites perturbations)
- Linéarité géométrique : déplacements et rotations faibles (HPP)



$$\sigma = \frac{P}{S}$$

$$\sigma = E\varepsilon$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{L}$$



$$\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{C}} : \underline{\underline{\varepsilon}}$$

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \nabla^s u$$

Non linéarités en mécanique des milieux continus

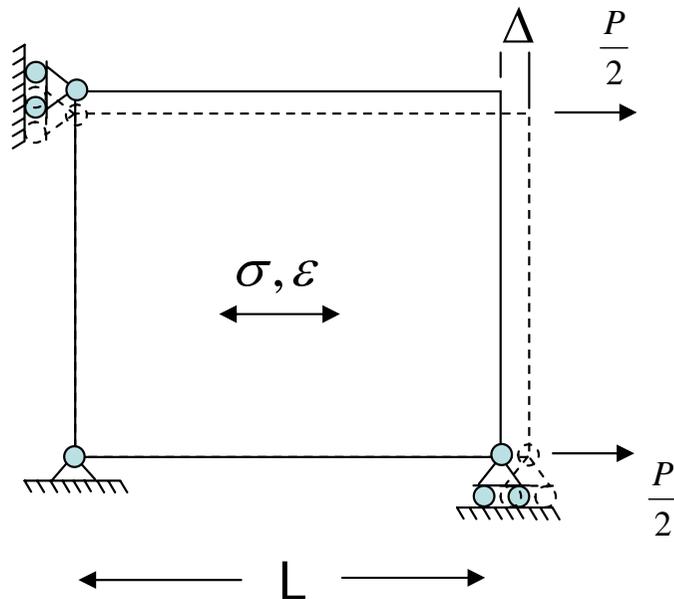
➤ Non linéarités matérielles

- Elles sont associées au comportement du matériau
- Elles apparaissent dès que le comportement ne peut plus être considéré comme linéaire
- En mécanique : élastoplasticité, superplasticité, hyperélasticité, élasticité non-linéaire, viscoplasticité, viscoélasticité, dépendance à la température ...
- En thermique : dépendance à la température des coefficients de diffusion, conductivité thermique, chaleur spécifique,

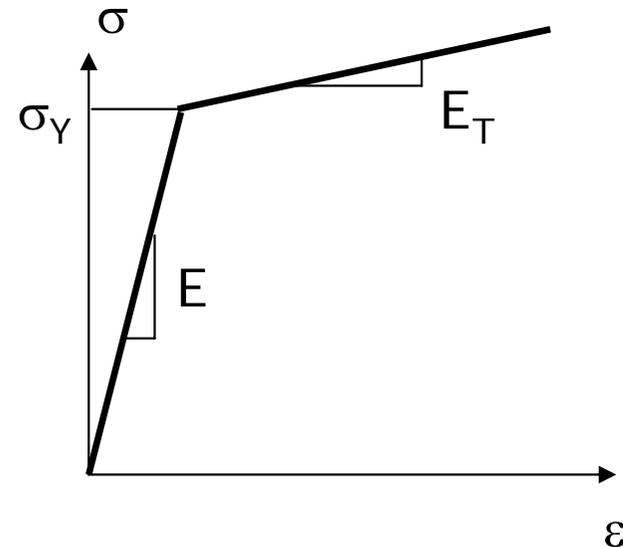
Non linéarités en mécanique des milieux continus

➤ Non linéarités matérielles

- Exemple en mécanique : traction dans le domaine élasto-plastique en HPP



$$\sigma = \frac{P}{S}$$



$$\varepsilon = \frac{\sigma_Y}{E} + \frac{\sigma - \sigma_Y}{E_T}$$

Par contre, le comportement est linéaire du point de vue géométrique

Non linéarités en mécanique des milieux continus

➤ Non linéarités matérielles

- Exemple en thermique : équation de la chaleur en transitoire sans advection

$$\rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (k(x, T) \nabla T) + \frac{\dot{q}}{V}$$

- Cas linéaire : non dépendance des coefficients matériels à la température

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + \frac{\dot{q}}{V}$$

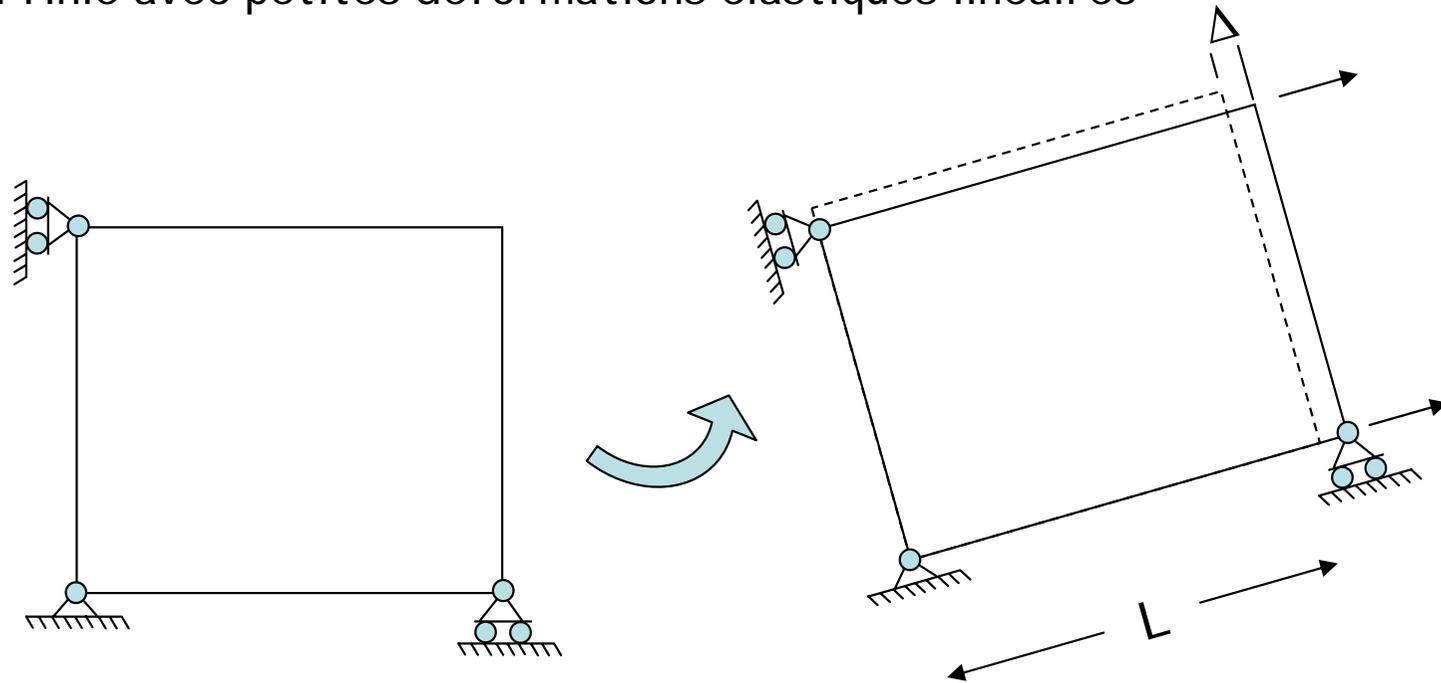
Non linéarités géométriques

➤ Non linéarités géométriques

- Ce type de non linéarité apparaît dès lors que l'on quitte l'hypothèse des petites transformations
- Ces non linéarités sont donc associées à des grands déplacements et/ou des grandes rotations : transformations finies.

Non linéarités géométriques

- Exemple : rotation finie avec petites déformations élastiques linéaires



- La déformation (donc associée à la géométrie) est non linéaire en u

$$\underline{\underline{E}} = \frac{1}{2} (\nabla u + \nabla u^T + \nabla u^T \nabla u)$$

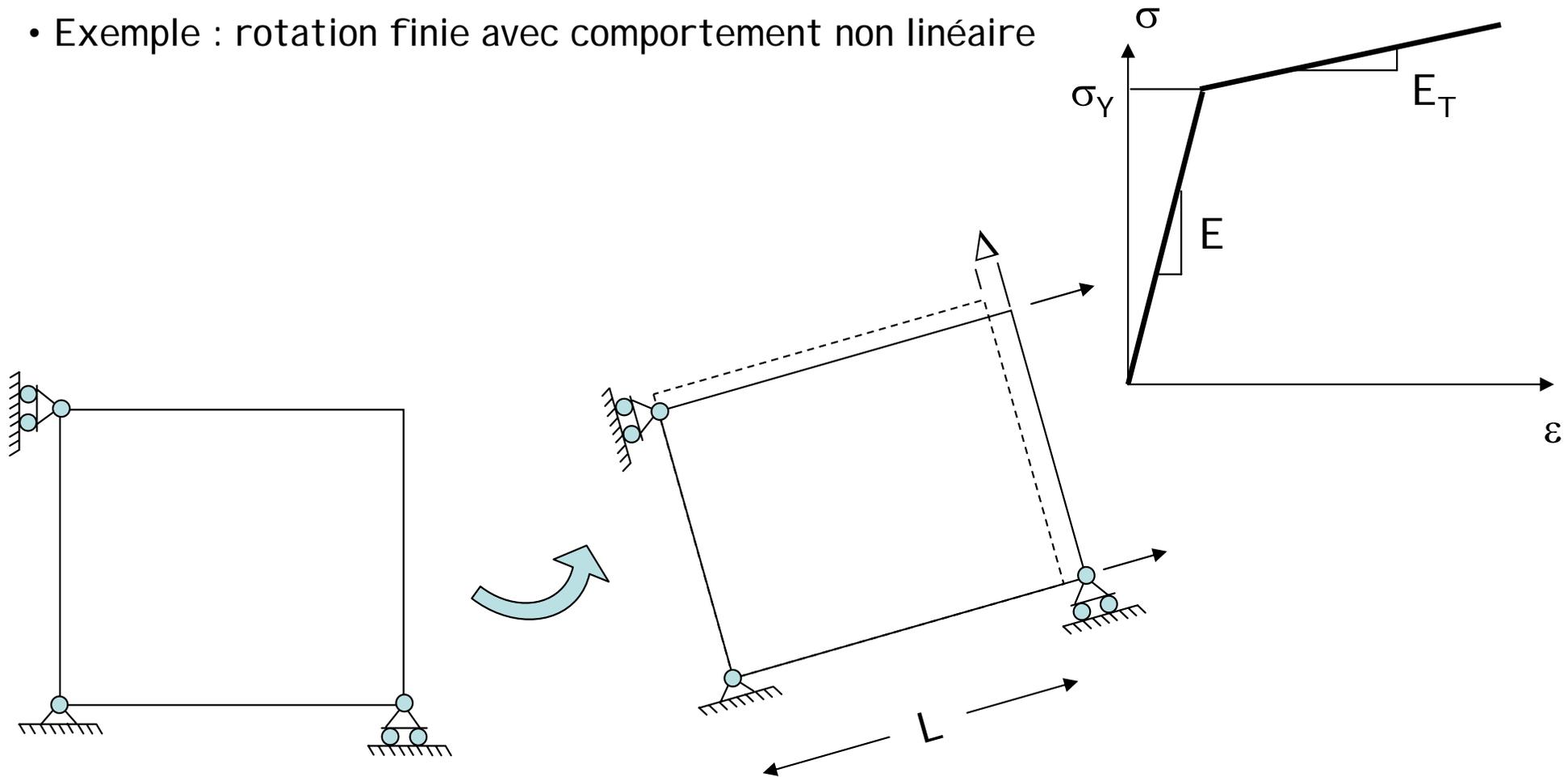
- Le comportement matériel est linéaire en E (mais non-linéaire en u)

$$\underline{\underline{S}} = \underline{\underline{C}}^{ep} : \underline{\underline{E}}$$

Non linéarités géométriques et matérielles

➤ Non linéarités géométriques et matérielles

- Exemple : rotation finie avec comportement non linéaire



Non linéarités des conditions aux limites

➤ Non linéarités des conditions aux limites

- On rappelle que dans le cas de la résolution des équations différentielles, il est nécessaire d'introduire des conditions aux limites et des conditions initiales (cas d'équations différentielles dépendantes du temps)

- Il existe trois grandes catégories de conditions aux limites

- Conditions de Neumann : on impose une valeur aux champs sur la frontière du domaine (déplacement imposé en mécanique, vitesse en méca flu, température en thermique...)

Ex mécanique $u = \bar{u}$

Ex thermique $T = T_{imp}$

- Conditions de Dirichlet : on impose une valeur à la dérivée première des champs sur la frontière (en mécanique : contrainte normale, en mécanique des fluides : pression, en thermique : le flux de chaleur...)

Ex mécanique $\underline{\sigma}n = \bar{t}$

Ex thermique $k\nabla T = q$

- Conditions mixtes : association des deux conditions

- Conditions de Robin-Fourier

Non linéarités de contacts

➤ Non linéarités associées aux contact

- Dans le cas général, on étudie le comportement et l'interaction de plusieurs composants
- On est amené à introduire des conditions de contact
- Ces conditions imposent de fortes non linéarité : contact unilatéral, frottement, échanges thermiques, effet stick and slick
- C'est une forte source de non-linéarités et surtout de problèmes numériques

Modes de transfert de chaleur

Thermique – Équation de la chaleur
Conduction
Convection
Rayonnement

Modes de transfert de chaleur

➤ Modes de transfert de chaleur

• En thermique : il existe trois grandes catégories de transfert de chaleur

➤ Conduction : c'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de la matière, sous l'influence d'une différence de température (loi de Fourier)

$$\rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) + \frac{\dot{q}}{V}$$

Conductivité thermique
(W/m/°K)

➤ Convection : c'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide (Loi de Newton)

$$\dot{q} = hS(T - T_e)$$

Température extérieure

Aire de la surface en contact solide/fluide

Coefficient de transfert de chaleur (W.m⁻².K⁻¹)

Modes de transfert de chaleur

➤ Rayonnement : C'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces (même dans le vide)

$$\dot{q} = \sigma \varepsilon S (T^4 - T_e^4)$$

σ : constante de Stephan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$)

ε : Facteur d'émission de la surface (SD)

S : Aire de la surface (m^2)

Algorithmes d'intégration

Algorithmes d'intégration
Explicite et Implicite

-

Intégration temporelle
Schéma des différences finies

Algorithmes d'intégration

➤ Discrétisation de l'équation de mouvement avec la méthode de Galerkin

- Équilibre dynamique/quasi-statique

$$\begin{aligned}\underline{\sigma}n &= \bar{t} \text{ sur } \Gamma_t \\ u &= \bar{u} \text{ sur } \Gamma_u\end{aligned}$$

$$\operatorname{div} \underline{\sigma} + \rho f = \rho \gamma$$

$$\{F_{inertie}(t)\} + \{R^{int}(t)\} = \{R^{ext}(t)\}$$

Systeme matriciel différentiel du second ordre non linéaire couplé

$$\operatorname{div} \underline{\sigma} + \rho f = 0$$

$$\{R^{int}(t)\} = \{R^{ext}(t)\}$$

Systeme matriciel couplé (linéaire ou non-linéaire)

Algorithmes d'intégration explicite (1)

- La matrice masse est diagonale par construction
 - Iso répartition de la masse d'un élément aux nœuds
- La matrice masse est diagonalisée (matrice masse diagonale)
 - Technique 1 : matrice masse consistante (lumped mass matrix)

$$\begin{cases} M_{ii} = m_{ii} + \sum m_{ij} \\ M_{ij} = 0 \end{cases}$$

On renforce les termes diagonaux par la somme des termes extra-diagonaux

- Technique 2 : Special Lumping technique (Belytschko)

$$M_{ii} = \frac{\int_{\Omega} \rho d\Omega}{\sum_{k=1}^n \int_{\Omega} N_k \rho N_k d\Omega} \cdot \int_{\Omega} N_i \rho N_i d\Omega$$

Cette technique de diagonalisation permet de conserver l'équilibre global équivalent du système (conservation de l'énergie cinétique) par un traitement différencié des degrés de libertés en translation et de rotation

Algorithmes d'intégration explicite (1)

- Dans le cas où la matrice masse est diagonale, il est possible de remonter à l'accélération sans inverser de matrices

$$\{\ddot{u}\}_n = [M]^{-1} \left(\{R^{ext}\} - \{R^{int}\} \right)$$

- La plupart du temps, l'intégration temporelle se fait par une méthode des différences centrées (méthode explicite)

$$\{\ddot{u}\}_n = \frac{1}{\Delta t} \left(\{\dot{u}\}_{n+\frac{1}{2}} - \{\dot{u}\}_{n-\frac{1}{2}} \right) = \frac{1}{\Delta t^2} \left(\{u\}_{n+1} - 2\{u\}_n + \{u\}_{n-1} \right)$$

- Etape 2 : Il vient alors immédiatement les champs de vitesse et de déplacement

$$\{\dot{u}\}_{n+\frac{1}{2}} = \{\dot{u}\}_{n-\frac{1}{2}} + \Delta t_n [M]^{-1} \left(\{R_n^{ext}\} - \{R_n^{int}\} \right)$$

$$\{u\}_{n+1} = \{u\}_n + \Delta t \frac{1}{n+\frac{1}{2}} \{\dot{u}\}_{n+\frac{1}{2}}$$

Algorithmes d'intégration explicite (3)

- Etape 3 : On calcul les efforts intérieurs (champs de contraintes)

➤ Pour chaque élément et en chaque point d'intégration

Calcul des vitesses de déformations : $\underline{D}_{n+\frac{1}{2}} = [\nabla N] \{\dot{u}^e\}_{n+\frac{1}{2}}$

Calcul des vitesses de contraintes : $\underline{\sigma}_{n+\frac{1}{2}} = \underline{A} \underline{D}_{n+\frac{1}{2}}$

Mise à jour du tenseur des contraintes : $\underline{\sigma}_{n+1} = \underline{\sigma}_n + \Delta t \underline{\sigma}_{n+\frac{1}{2}}$

Calcul des efforts intérieurs élémentaires: $\{R_{e,n+1}^{int}\} = \int_{\Omega_e} [\nabla N]^t \underline{\sigma}_{n+1} d\Omega$

Calcul des efforts intérieurs globaux (Assemblage) $\{\ddot{u}\}_{n+1} = [M]^{-1} \left(\{R_{n+1}^{ext}\} - \{R_{n+1}^{int}\} - [C^{am}] \{\dot{u}\}_{n+\frac{1}{2}} \right)$

- Etape 4 : Calcul des efforts extérieurs (chargement + mise à jour des CL)
- Etape 5 : Bilan énergétique
- Etape 6: Calcul des nouvelles accélérations
- Passage à l'incrément suivant

Algorithmes d'intégration explicite (4)

- Cet algorithme est vrai si pas de contact et éléments totalement intégrés

Dans le cas contraire, on doit ajouter deux termes supplémentaires

Calcul des efforts d'Hourglass

Calcul des efforts de contact

→ Une description sera faite dans la suite

- Avantages :

- Facile à mettre en œuvre
- Si la matrice masse est diagonale, il n'y a pas à résoudre d'équations

Les calculs n'ont pas besoin de ressources informatiques importantes (RAM)

- Robuste (une des raisons de l'utilisation de cet algorithme en mise en forme)

- Désavantages :

- Différences Centrées : Conditionnellement stable (Pas de temps limités)
- Nombres de cycles importants : Les temps de calculs peuvent être prohibitifs ...
- Problèmes pour simuler des phénomènes stationnaires

Algorithmes d'intégration explicite (5)

➤ Le temps est en principe physique (sauf problèmes recalés)

L'algorithme dynamique transitoire explicite consiste donc à discrétiser le problème en de petits incréments (pas de temps stable associé au schéma des différences finies). Par résolution du système matriciel associé aux équations de mouvement, on remonte au fur et à mesure à la solution finale.

- Dans le cas explicite, on reste dans l'hypothèse des petites perturbations
- Cet aspect est très avantageux dans le cas de l'implémentation du comportement
- Pour certains problèmes, le temps est donc recalé et notamment lorsque des calculs quasi-statiques sont tentés
- Pour cela, on retiendra qu'il n'y a pas de règle sur le temps total de la simulation (temps numériques)
- En pratique, certaines personnes préconisent des vitesses de l'ordre de 1 m/s à 10 m/s pour tendre vers un régime statique (ceci n'est qu'une approximation)
- Pour ma part, tenter cet ordre de grandeur et augmenter jusqu'à ne plus avoir de grandes variations sur la réponse
- On peut aussi utiliser de l'amortissement, mais il faut faire très attention

Algorithmes d'intégration de Newmark (1)

- La matrice masse n'est pas diagonale
- Algorithme en dynamique : β -Méthode de Newmark

$$\begin{aligned} \{u_{n+1}\} &= \{\tilde{u}_{n+1}\} + \beta \Delta t^2 \{\ddot{u}_{n+1}\} & \{\tilde{u}_{n+1}\} &= \{u_n\} + \Delta t \{\dot{u}_{n+1}\} + \frac{\Delta t^2}{2} (1 - 2\beta) \{\ddot{u}_n\} \\ \{\dot{u}_{n+1}\} &= \{\dot{\tilde{u}}_{n+1}\} + \beta \Delta t \{\ddot{u}_{n+1}\} & \{\dot{\tilde{u}}_{n+1}\} &= \{\dot{u}_n\} + (1 - \gamma) \Delta t \{\ddot{u}_n\} \\ \{\ddot{u}_{n+1}\} &= \frac{1}{\beta \Delta t^2} \{u_{n+1} - \tilde{u}_{n+1}\} \text{ avec } \beta > 0 \end{aligned}$$

β : contrôle la stabilité de l'algorithme / γ : contrôle la dissipation numérique

- Algorithmes associés

$\beta = 0, \gamma = \frac{1}{2}$: Méthode des différences centrées (explicite)

$\beta = \frac{1}{4}, \gamma = \frac{1}{2}$: Règle du trapèze (non amorti)

- Inconditionnellement stable pour $\beta \geq \frac{\gamma}{2} \geq \frac{1}{4}$

- Utilisations : phase de gravité, phase de mise en action (rotor), chocs basses vitesses (tests de retournement) ou de relâchement de structure

Algorithmes d'intégration de Newmark (2)

➤ Avantages :

- Dans le cas d'un algorithme inconditionnellement stable : pas de temps plus grands qu'en explicite
- Très adaptés à la simulation de phénomènes transitoires longs (phases de gravité, mise en action des machines tournantes)

Algorithmes d'intégration implicite (1)

➤ Algorithme en quasi-statique : Méthode de Newton-Raphson et confrères

- Il consiste en la résolution d'un système non linéaire

$$\left([K^L] + [K^{NL}(u_{n+1}^i)] + [K^\sigma(u_{n+1}^i)] \right) \{u_{n+1}^i + \Delta u_{n+1}^{i+1}\} = \{R_{n+1}^{ext}\}$$

- Où le problème a été discrétisé en N incréments, et on cherche à trouver $\{u_{n+1}\}$
- On doit alors inverser le système et calculer l'incrément de déplacement à l'itéré $i+1$
- On réactualise alors les déplacements
- Puis les déformations, les contraintes
- Calcul des efforts intérieurs
- Le processus à converger ?

$$\left\| \{R_{n+1}^{int,i+1}\} - \{R_{n+1}^{ext,i+1}\} \right\| \leq tol$$

Si oui alors on passe à l'incrément suivant,

Si non on passe à l'itération suivante jusqu'à obtenir un processus convergent

Algorithmes d'intégration implicite (2)

- Algorithme inconditionnellement stable (grand pas de temps)
- La prise en compte de phénomènes dépendant du temps ne peut se faire uniquement que dans la loi de comportement
- Le processus itératif peut diverger (très souvent)
 - Utilisation d'artifices de stabilisation,
 - Modification des algorithmes : BFGS, Gradient Conjugué, Pré conditionnement, Linesearch, ...
 - Pas de temps automatiques : si le processus itératif ne converge pas au bout d'un certain nombre d'itérés alors on diminue la taille de l'incrément
- Le contact comme conséquence principale de divergences
 - Phénomènes de localisation dus aux non linéarités de contact, non linéarités géométriques des structures minces flexibles
- Pour y remédier, on peut utiliser un algorithme explicite qui est plus robuste
 - Lissages des phénomènes

Algorithmes d'intégration implicite (3)

➤ Le temps n'est pas physique

- De part sa définition, la notion de temps n'intervient pas explicitement
- Les pas de temps (incréments) ne servent ici qu'à établir un processus convergent
- Dans le cas linéaire, un seul incrément permet souvent d'aboutir à la solution
- On peut néanmoins introduire le temps physique mais uniquement par utilisation de la loi de comportement avec sensibilité à la vitesse (ou au temps)
- Dans ce cas les courbes d'évolution sont liées à un temps physique

L'algorithme implicite consiste alors à rechercher l'équilibre en chaque incrément (pas de temps), par un processus itératif. Malgré son caractère inconditionnellement stable, les processus peuvent diverger.

- Dans le cas d'un algorithme d'intégration implicite: les pas de temps (incréments) sont grands
- On n'utilise plus le formalisme petites perturbations
- La mise en œuvre est alors beaucoup plus complexe que dans le cas explicite

Algorithmes d'intégration implicite et couplage (4)

- Analyse modale (Blocs Lanczos, Boeing ou Nastran) : très pratique pour débusquer les erreurs de CL
 - Analyse de bifurcation (calcul des modes de flambement)
 - Depuis la version 970, il est possible d'effectuer des analyses utilisant une méthode alternée explicite/implicite
-
- Permet une extraction modale pendant le fonctionnement du mécanisme (ex: turbines)
 - Permet de diminuer les temps de calcul :
 - ✓ On utilise une méthode implicite (pas de temps plus grand)
 - ✓ Si le processus diverge et le pas de temps automatique chute drastiquement, on passe à une méthode explicite
 - ✓ Lorsque la localisation est passée, on repasse en implicite
 - ✓ procédures automatiques, semi-automatiques ou manuelles

Stabilité du schéma explicite

Méthode explicite
Condition de stabilité
et
Calcul du pas de temps

Stabilité de la méthode explicite et calcul du pas de temps (1)

➤ La méthode des différences centrées est stable si

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{Max}} \quad \Delta t \leq \frac{2}{\omega_{Max}} \left(\sqrt{1 + \xi^2} - \xi \right) \longrightarrow \text{Amortissement}$$

ω_{Max} : Plus grande valeur propre du système aux valeurs propres

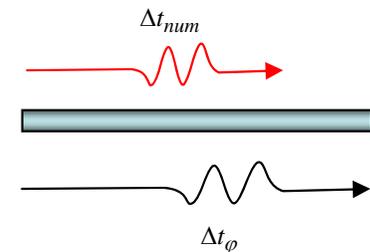
- Le pas de temps est limité par la plus grande fréquence naturelle de la structure
- L'algorithme d'intégration est stable, si le pas de temps diminue

➤ Néanmoins, il faut adapter cette condition dans le cadre de la MEF

$$\Delta t \leq \frac{l_c}{c} \quad \text{Condition de stabilité de Courant Friedrich Levy}$$

l_c : longueur caractéristique de l'élément (barre)

c : vitesse de propagation acoustique

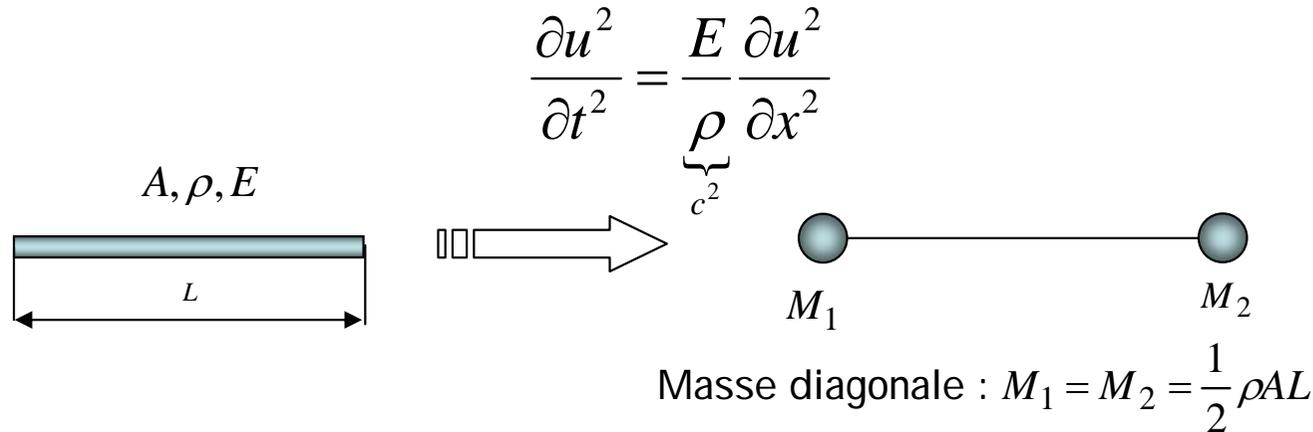


Le pas de temps numérique doit être plus petit que le temps
nécessaire par l'onde physique pour traverser l'élément

Cette condition n'est appliquée qu'aux corps déformables

Stabilité de la méthode explicite et calcul du pas de temps (2)

➤ Établissement de la condition de stabilité de Courant-Friedrichs-Levy



Matrice de raideur

$$K = \frac{EA}{L} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$$

Matrice de masse

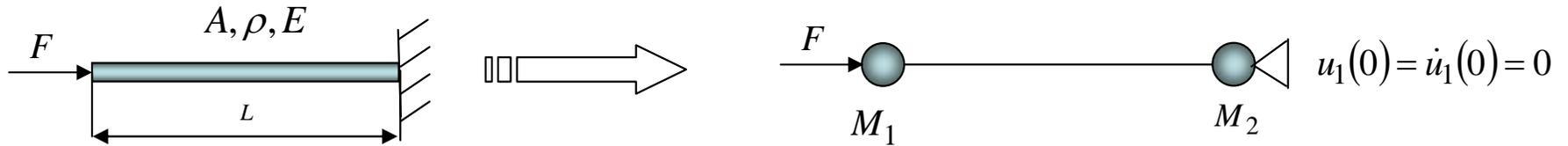
$$M = \frac{\rho A L}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Calcul des fréquences propres :

$$\det \left(\frac{EA}{L} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} - \omega^2 \frac{\rho A L}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \right) = 0$$

$$\omega_{Max} = \frac{2}{L} \sqrt{\frac{E}{\rho}} = 2 \frac{c}{L} \Rightarrow \Delta t = \frac{L}{c}$$

Interlude : comparaison calcul explicite/implicite



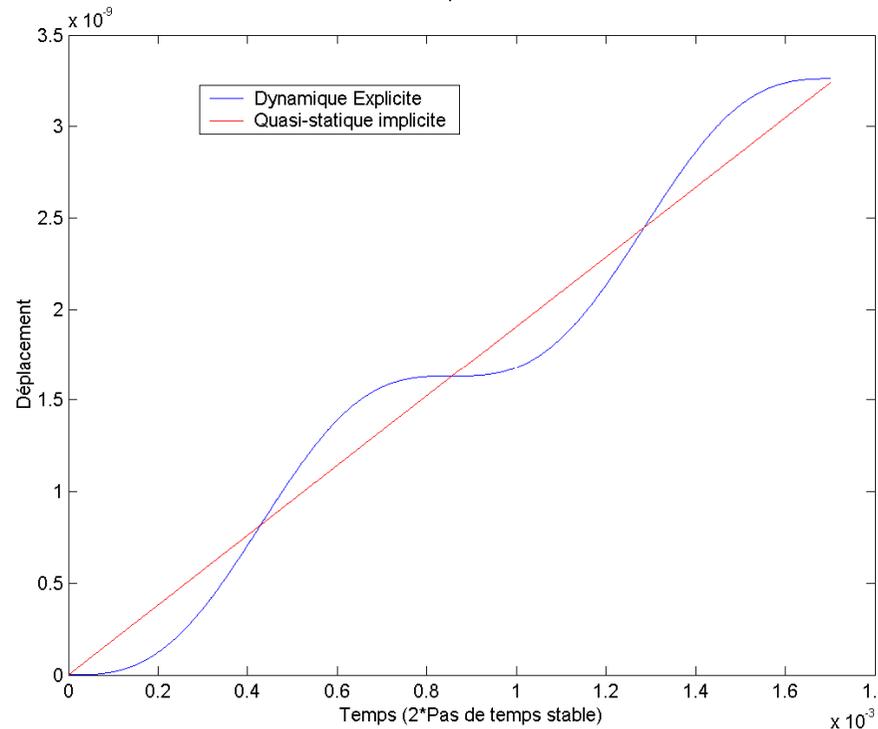
$$\begin{cases} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{cases} = \frac{2}{\rho AL} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \left(\begin{Bmatrix} F_1 \\ 0 \end{Bmatrix} - \frac{EA}{L} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \right)$$

$$F = \frac{\alpha}{\tau} t$$

$$\frac{EA}{L} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$u_1 = -\frac{\alpha L}{EA \tau} \left(\frac{\sin \omega t}{\omega} - t \right)$$

$$\omega = \frac{2}{L} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

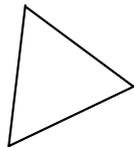
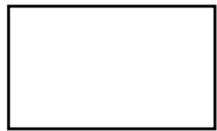


$$u_1 = \frac{\alpha L}{EA \tau} t$$

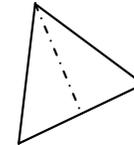
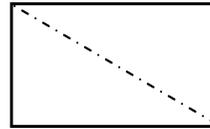
Stabilité de la méthode explicite et calcul du pas de temps (3)

➤ Dans le cas d'éléments coques

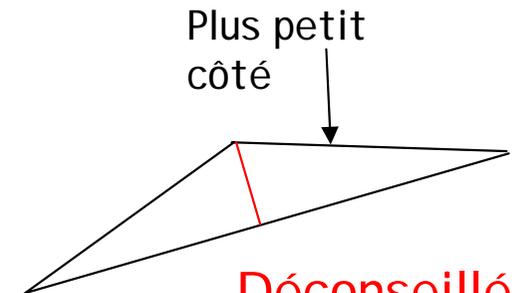
l_c : Plusieurs choix sont possibles



Aire/Plus grand côté (Par défaut)



Aire/Plus grande diagonale (ou hauteur)
| SDO=1
(CONTROL_TIMESTEP)



Déconseillé
Maximum entre Aire/Plus grand côté et le plus petit côté
| SDO=2
(CONTROL_TIMESTEP)

$c = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}}$: vitesse de propagation acoustique (somme de barres avec prise en compte des déformations transverses)

- Présences des modes de flexion et de membrane
- la fréquence de membrane limite le pas de temps
- Raideur en membrane est plus importante que son équivalent en flexion

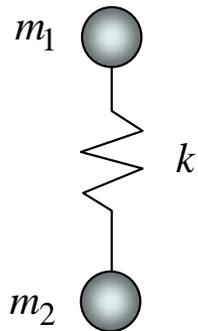
Stabilité de la méthode explicite et calcul du pas de temps (4)

➤ Dans le cas d'éléments volumiques

$$c = \sqrt{\frac{3K + 4G}{3\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

- Problèmes pour les matériaux caoutchouteux (incompressibilité $K \rightarrow \infty$)

➤ Cas d'éléments discrets (ressorts)



$$\Delta t = \sqrt{\frac{4m_1m_2}{k(m_1 + m_2)}} = \sqrt{\frac{2m}{k}}$$

- Même si le ressort a une longueur nulle, son pas de temps est fini
- Ce qui n'est pas le cas d'un élément barre

➤ Cas d'éléments de cordons de soudure (spotweld)

- Équivalent à un élément de poutre pour le calcul du pas de temps

Stabilité de la méthode explicite et calcul du pas de temps (4)

➤ Applications pratiques

Pratiquement, on calcule le plus petit pas de temps dans le système et on le multiplie par un facteur de sécurité (0,9). On obtient alors en théorie le pas de temps stable (on verra par la suite ...)

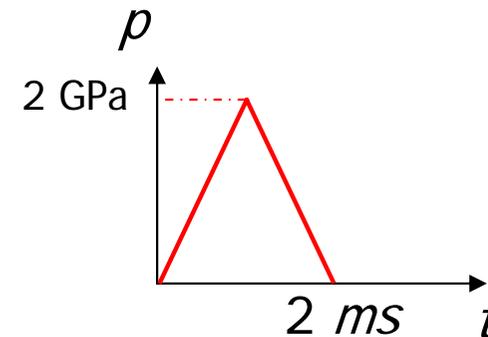
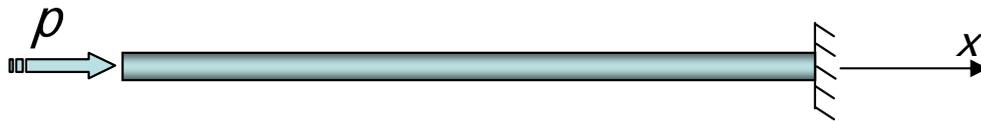
```
*CONTROL_TIMESTEP
$ DTINIT TSSFAC ISDO TSLIMIT DT2MS LCTM ERODE MS1ST
  0.000  0.90  0  0.0  0.00  0  0  0
```

$$\Delta t = TSSFAC \times \min(\Delta t_{structure})$$

- Dans le fichier *d3hsp*, LS-DYNA reporte les 100 éléments avec les plus petits pas de temps
- La carte IPNINT dans le mot clé *CONTROL_OUTPUT permet de sauvegarder le pas de temps initial de tout les éléments du modèle
- Dans le cas de matériaux métalliques, la valeur TSSFAC=0.9 est suffisante
- Dans le cas de matériaux fortement non-linéaires (du point de vue comportement), cette valeur est susceptible d'être diminuée (caoutchouc, explosifs, mousses...)
- Dans le cas des mousses (comportement cellulaire), une valeur de TSSFAC<0.66 est souvent nécessaire

Stabilité de la méthode explicite et calcul du pas de temps (5)

- Exemple : propagation d'une onde de compression à spectre triangulaire dans une barre (d'après P. Dubois)



- On charge une barre d'une longueur de 10m par l'intermédiaire d'une contrainte de compression à spectre triangulaire (amplitude de 2GPa) pendant 2 ms
- Simulation de la propagation d'une onde de choc (comportement élasto-plastique)
- La barre est en plomb : $\rho = 10000 \text{ kg/m}^3$, $G = 7 \text{ GPa}$, $K = 16 \text{ GPa}$
- La vitesse de l'onde acoustique est

$$c = \sqrt{\frac{3K + 4G}{3\rho}} \approx 1600 \text{ m.s}^{-1}$$

- En principe, il est possible de calculer le temps mis par l'onde pour traverser entièrement la barre

$$t = \frac{L}{c} = \frac{10 \text{ m}}{1600 \text{ m.s}^{-1}} = 6.25 \text{ ms}$$

Stabilité de la méthode explicite et calcul du pas de temps (5)

- La période du chargement est de 2 ms, pendant ce temps l'onde aura parcouru

$$L_{2ms} = 2ms * 1600m.s^{-1} = 3.2m$$

- Dans le cas de la première analyse (maillage régulier avec longueur de 10 mm), le pas de temps est de

$$\Delta t = 0.9 \frac{l_c}{c} = 5.33e - 3 ms$$

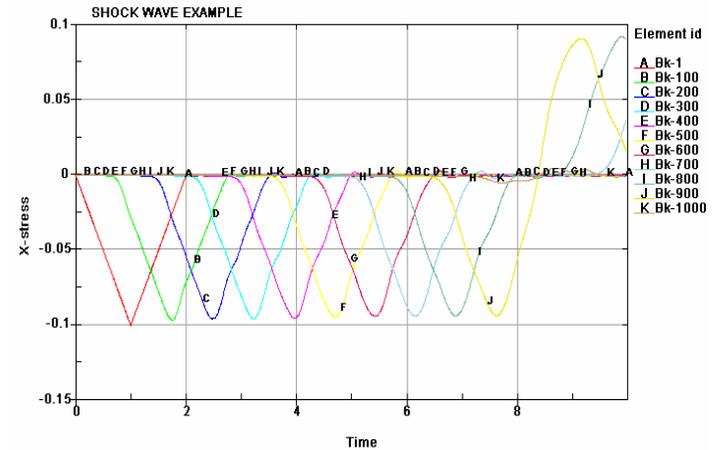
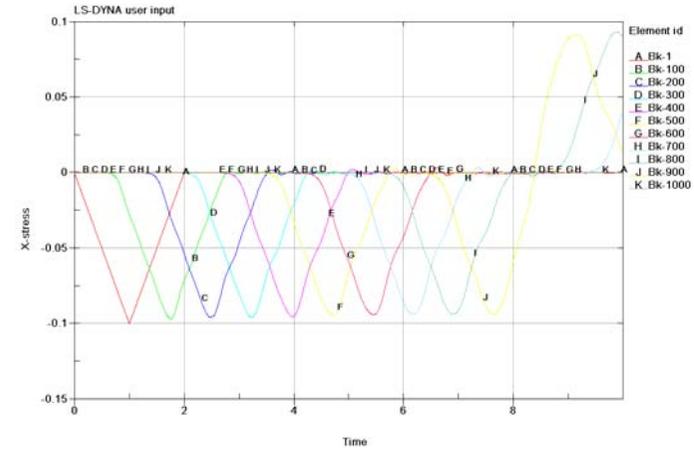
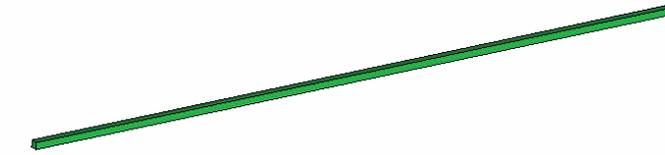
➤ But de l'étude

- Mise en place d'un calcul simple
- Savoir reconnaître si le calcul est correctement maîtrisé (contrôlé)
- Démontrer l'influence de la taille du maillage et de ses limites sur les réponses (fréquences) que l'on peut représenter pour une longueur d'onde donnée
- Savoir faire la part d'une réponse physique d'une réponse numérique

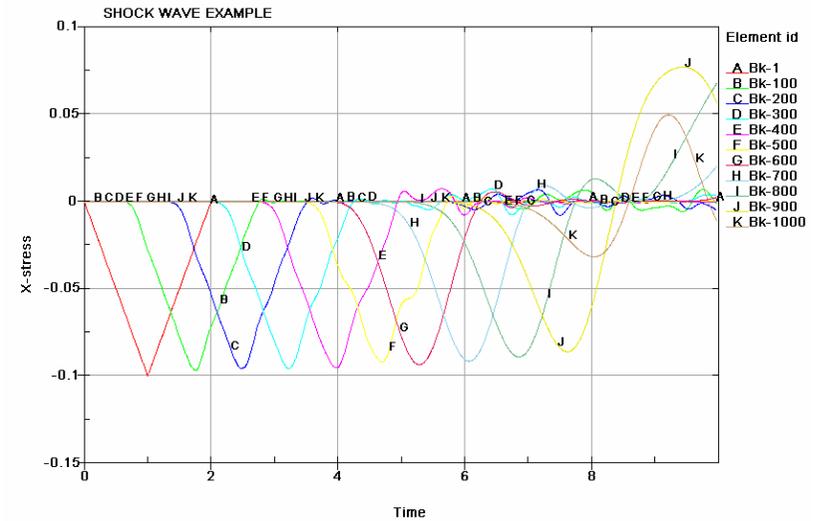
Stabilité de la méthode explicite et calcul du pas de temps (5)

Maillage régulier : 1000 éléments de 10 mm

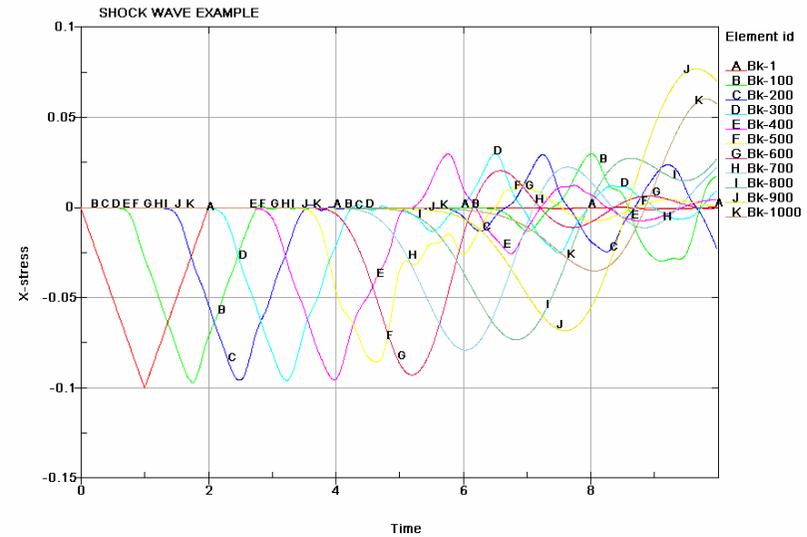
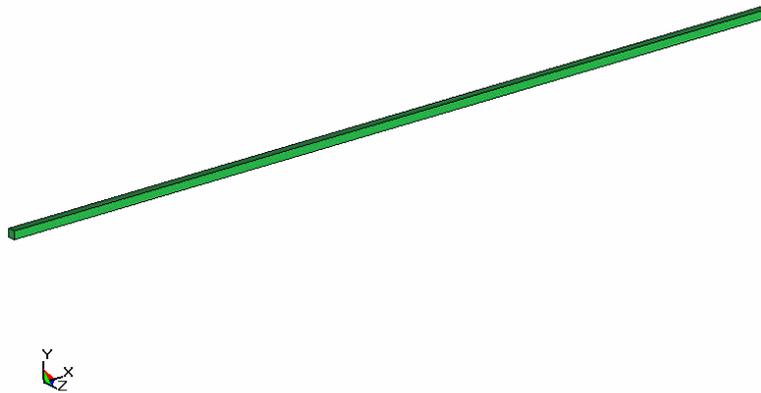
LS-DYNA user input
Time = 0



Stabilité de la méthode explicite et calcul du pas de temps (5)

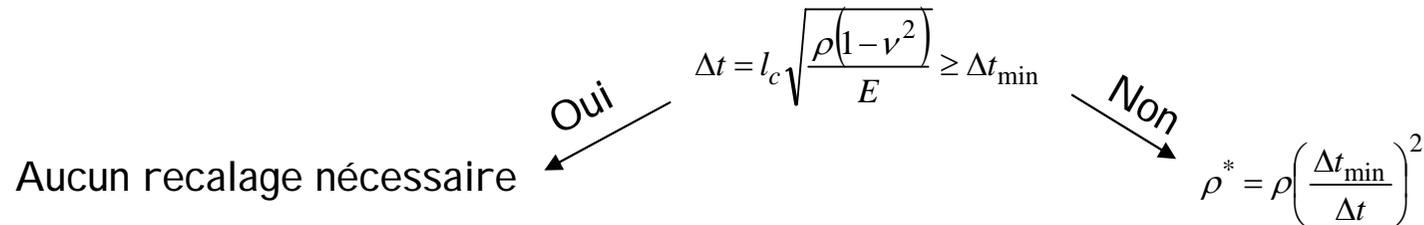


SHOCK WAVE EXAMPLE
Time = 0



Augmentation Artificielle du pas de temps : Mass scaling (1)

- LS-Dyna permet d'augmenter le pas de temps par ajout de masse sur les éléments conditionnant le pas de temps (mass scaling)
- On définit un pas de temps minimum
 - La procédure de mass scaling s'opère sur tout les éléments individuellement



➤ Deux possibilités dans *CONTROL_TIMESTEP

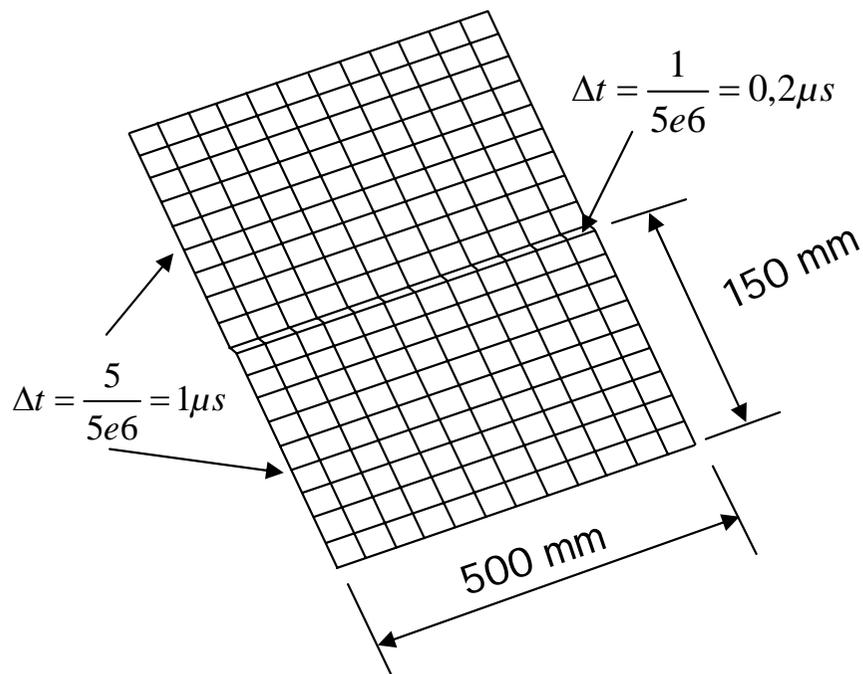
```
*CONTROL_TIMESTEP
$ DTINIT TSSFAC ISDO TSLIMIT DT2MS LCTM ERODE MS1ST
  0.000  0.90  0  0.0  0.00  0  0  0
```

- MS1ST : Recalage pendant le premier cycle uniquement
- DT2MS : Recalage répété tout les pas de temps

Augmentation Artificielle du pas de temps : Mass scaling(2)

➤ L'ajout de masse artificielle peut être visualisée :

- A l'initialisation le fichier d3hsp indique l'erreur globale commise sur la masse $\frac{\Delta M}{M}$
- Cette option est très utilisée en mise en forme et en crash
- Elle doit être utilisée avec prudence, car l'augmentation de masse dépend du carré du temps recalé



- Dans le cas suivant on veut un pas de temps de $1 \mu s$

$$\rho_s = 25 \rho$$

$$\delta m = n \times \delta \rho \times L \times l \times h = 100 \times 24 \rho \times 5 \times 1 \times h = 12000 \rho h$$

$$\frac{\delta m}{M} = \frac{12000 \rho h}{(150 \times 500 \times 2 + 12000) \rho h} = 0,08$$

- On a introduit dans la structure près de 10% de masse supplémentaire
- Cet apport de masse modifie considérablement l'énergie cinétique

Augmentation Artificielle du pas de temps (3)

➤ Modification des modules d'incompressibilité et d'élasticité transversal

$$c = \sqrt{\frac{3K + 4G}{3\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

- Dans le cas de calculs où les déformations plastiques dominent les déformations élastiques (mise en forme et crash), on peut modifier les propriétés élastiques afin d'augmenter le pas de temps
- Cette technique est souvent employée lorsque l'on développe sa propre loi de comportement (voir usermat), cela augmente aussi la stabilité de l'algorithme de résolution
- Cela explique pourquoi dans certaines lois, on introduit le module d'Young, le coefficient de Poisson **et** le module d'incompressibilité et le module d'élasticité transverse (même s'il existe une relation simple)
- Néanmoins, il faut faire attention à cette technique car ces paramètres sont utilisés dans l'algorithme de contact

Technologie des éléments finis

Choix des éléments
et technologies associées

-

Éléments de coques et volumiques
Poutres et cordons de soudure

Technologie des éléments coques

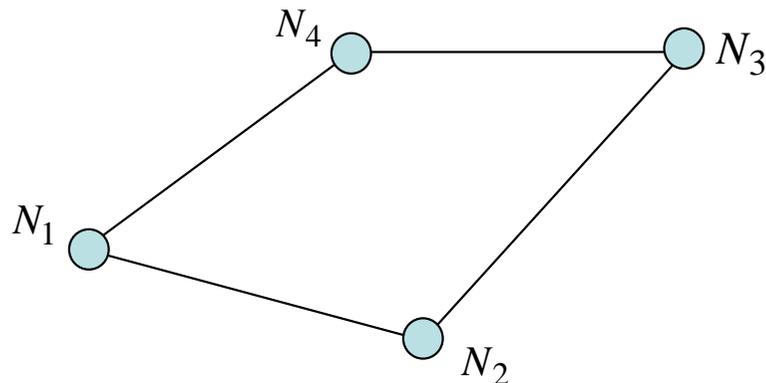
➤ Formulations de coques disponibles dans LS-DYNA

Type	Nom	Nombre de Nœuds	Degré d'interpolation	Tps CPU
1	Hugues-Liu	4	2	3,5
2	Belytschko-Lin-Tsay	4	2	1
3	Belytschko-Machertas	3	3	
4	Belytschko-Kennedy	3	2	
5	Membrane	4	2	
6	SRI Hugues-Liu	4	2	20
7	Fast SRI Hugues-Liu	4	2	10
8	Belytschko-Leviathan	4	2	1,3
9	Fully Integrated Membrane	4	2	
10	Belytschko-Wong-Chiang	4	2	1,1
11	Fast Hugues-Liu	4	2	
16	FI -ANS Bathe-Dvorkin	4	2	3,5

Technologie des éléments coques

➤ Principaux aspects théoriques des éléments de coques

- La plupart des formulations de coques sont des éléments à bas degré d'interpolation
- On utilise des fonctions d'interpolation de type bilinéaire
- La surface de l'élément est donc interpolée à partir des nœuds par des fonctions bilinéaires



- Ce type d'interpolation implique que les nœuds sont reliés par des lignes droites
- Dans le cas où les 4 nœuds sont coplanaires, la surface de l'élément est plane

➤ Avantages des éléments à bas degré d'interpolation

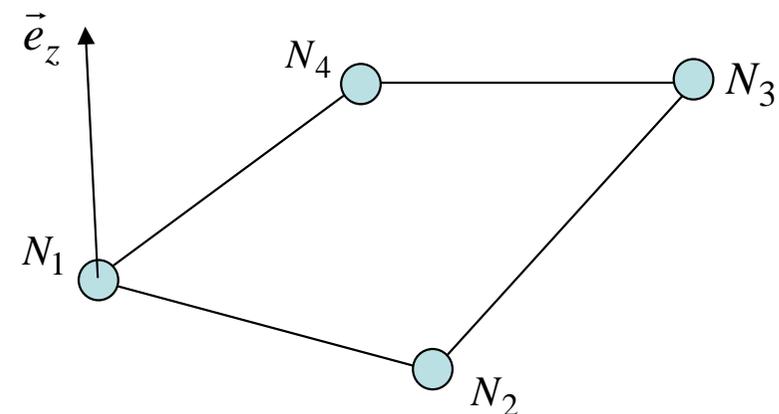
- Simple à introduire dans un code de calcul
- Grande robustesse du point de vue numérique
- Des éléments de plus haut degré mènent à une réduction du pas de temps dans le cas explicite

➤ La surface de l'élément représente le plan moyen de la coque (sauf elt 1,6,7,11)

Systeme de coordonnée local

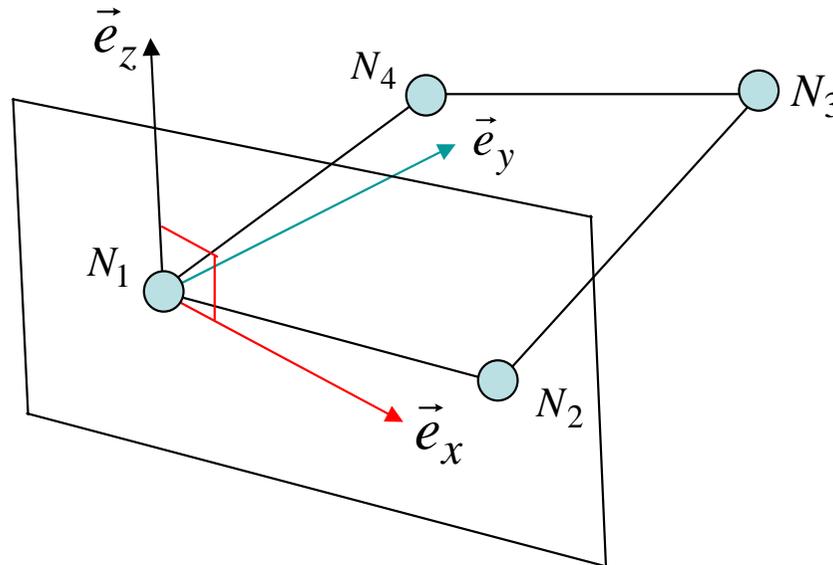
- Tout les calculs mis en place sur l'élément coque se fait dans système de coordonnées local
 - Repère local (ou corotationnel) : calcul des déformations, vitesses de déformation et contraintes
- Deux approches sont utilisées dans DYNA dans le cas des coques
 - Théorie des plaques de Reissner-Mindlin + effets de flexion
 - Théorie des coques CB (Continuum Based) et CBR (Continuum Based Resultant) basée sur la cinématique de Ahmad (Dégénérescence de l'élément de volume)
- Par défaut le système local est dépendant de la numérotation de l'élément
 - L'origine du repère est définie au nœud N_1
 - L'axe local z est déterminé par le produit vectoriel des 2 diagonales

$$\vec{e}_z = \frac{\overrightarrow{N_1N_3} \wedge \overrightarrow{N_2N_4}}{\|\overrightarrow{N_1N_3} \wedge \overrightarrow{N_2N_4}\|}$$



Systeme de coordonné local

- L'axe local x est le vecteur orthogonal à l'axe local z et positionné au mieux le long du côté N1N2



$$\vec{e}_x = \frac{\overrightarrow{N_1N_2} - (\overrightarrow{N_1N_2} \cdot \vec{e}_z) \vec{e}_z}{\left\| \overrightarrow{N_1N_2} - (\overrightarrow{N_1N_2} \cdot \vec{e}_z) \vec{e}_z \right\|}$$

- L'axe local y définit un repère orthonormé direct $\vec{e}_y = \vec{e}_z \wedge \vec{e}_x$
- Toutes les quantités scalaires, vectorielles ou tensorielles sont alors calculées dans ce repère local
- Puis elle seront projetées dans le repère global (par changement de base)

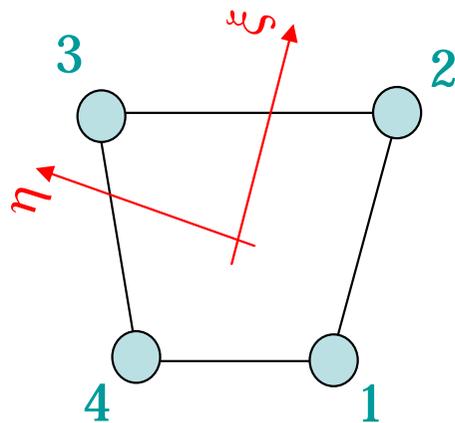
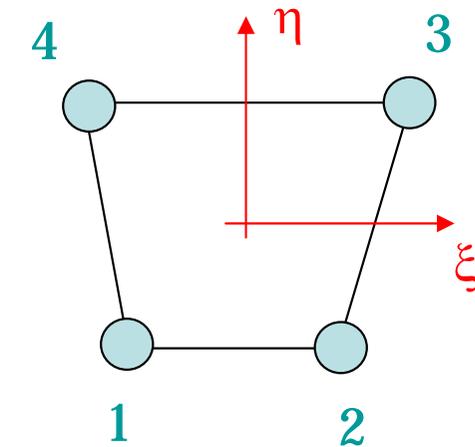
Objectivité et invariance de la numérotation

- La définition du repère local de référence est arbitraire puisque l'axe x est défini le long des côtés N1N2
- Cette approche implique une direction préférentielle dans l'élément dépendante de la numérotation des nœuds
- Cela mène à des problèmes dans le cas de grandes déformations (objectivité)
- Depuis la version 940 de Dyna, une formulation à nœud invariant du système local peut être choisie
- Cela augmente la stabilité numérique du comportement dans le cas où d'importantes déformations de cisaillement dans le plan apparaissent
- Cette formulation permet d'éviter des rotations non physiques du tenseur des contraintes (non-objectivité)

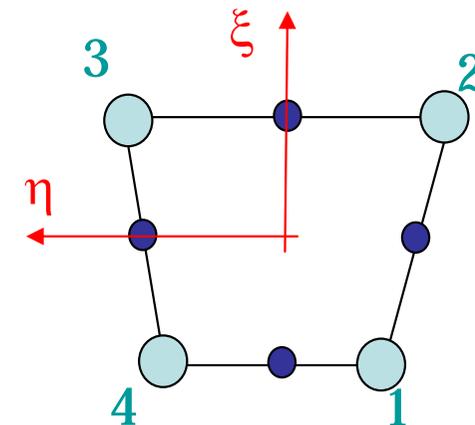
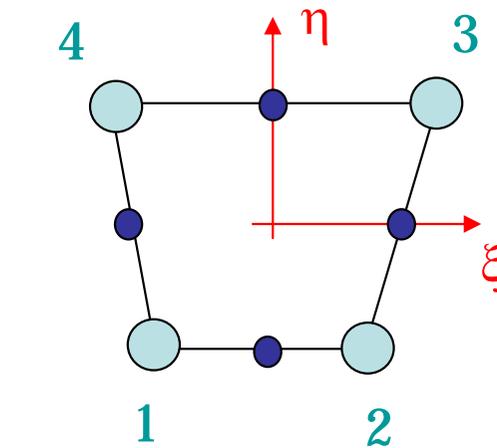
➤ Pour toutes les formulations d'éléments

- L'utilisation du mot clé *CONTROL_ACCURACY et de la carte INN=2 permet d'utiliser l'invariance de numérotation
- **Dans le cas implicite, cette commande est à utiliser sans conditions**
- Dans le cas explicite, elle est optionnelle sauf dans le cas de larges déformations de cisaillement (mousses...)
- La carte OSU=1 permet d'utiliser une mise à jour des contraintes selon une contrainte objective en (JAUMANN) : nécessite d'évaluer le comportement sur une configuration intermédiaire ($t_{n+1/2}$)

Objectivité et invariance de la numérotation



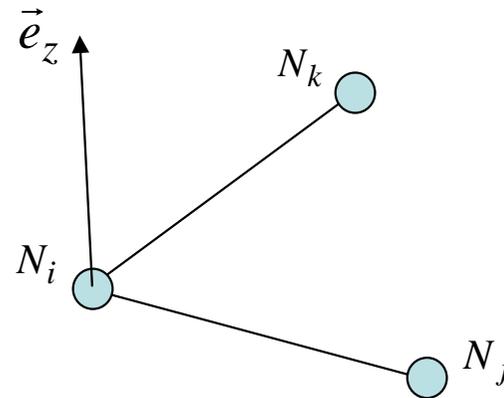
INN=1



INN=2

Formulation de plaque de type Reissner-Midlin

- On définit une normale unique pour chaque élément (voir procédure précédente)
- Par conséquent l'élément de coque se réduit à un élément de plaque
- Si l'élément subit une distorsion, la normale ne peut pas être orthogonal au plan de la coque pour tout les nœuds
- Dans le cas où les éléments sont déjà plat, ils doivent le rester
- Ceci est assuré pour empêcher une déviation du 4^{ème} nœud le long de l'axe z $\left\| \vec{e}_z \cdot \left(\overrightarrow{N_i N_j} \wedge \overrightarrow{N_i N_k} \right) - 1 \right\| \leq tol$



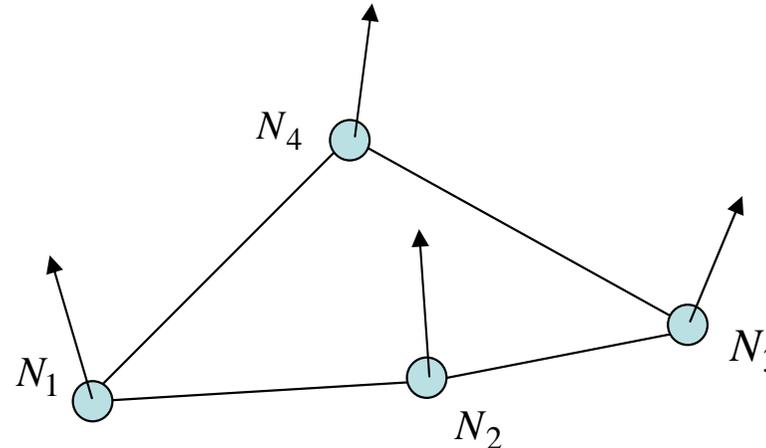
Ce type de formulation peut être obtenue par utilisation des options suivantes

- Type 1,6,7,11 avec la carte IRNXX=0 dans *CONTROL_SHELL
- Type 2 avec la carte BWC=0 dans *CONTROL_SHELL
- Type 16

Formulation de coque de type CBR (1)

- On définit une normale à chaque nœud comme étant le produit vectoriel des côtés adjacents au nœud

$$\vec{n}_i = \frac{\overrightarrow{N_i N_{i-1}} \wedge \overrightarrow{N_i N_{i+1}}}{\left\| \overrightarrow{N_i N_{i-1}} \wedge \overrightarrow{N_i N_{i+1}} \right\|}$$



- La fibre moyenne est maintenant définie comme une surface gauche
- La normale en chaque point P de cette surface peut être obtenue à l'aide des fonctions d'interpolation

$$\vec{n}_P = \sum_{i=1}^4 N_i(s,t) \vec{n}_i$$

- En chaque nœud, il existe plusieurs normales lorsque celui-ci est connecté à plusieurs éléments (lissage)
- Cette formulation est équivalente à celle de Reissner Mindlin dans le cas où l'élément est plat

Formulation de coque de type CBR (2)

Ce type de formulation peut être obtenue par utilisation des options suivantes

- Type 8 et 10
- Type 2 avec la carte BWC=1 dans *CONTROL_SHELL
- Type 1,11,6 et 7 avec la carte IRNXX=-2 dans *CONTROL_SHELL **et** si le maillage est lissé (régulier)
- Type 16 par utilisation de la carte IHG=8 dans *HOURGLASS

Intégration dans le plan

- Les champs de déplacements, vitesses et accélérations sont évalués aux nœuds des éléments
- Les champs de contraintes, de déformations, de variables historiques (variables internes) sont évalués aux points d'intégration
- Le nombre de points d'intégration et leurs positions sur la surface de l'élément dépendent du type d'élément choisi

➤ Plusieurs types d'intégration sont possibles

- Intégration complète (Fully integrated = FI) : 4 points de Gauss dans le plan de la coque pour évaluer toutes les composantes du tenseur des déformations
- Intégration réduite sélective (Selective Reduced Integration = SRI) : 4 points de Gauss dans le plan pour évaluer les déformations de membrane et de flexion, 1 point d'intégration au centre de l'élément pour évaluer les déformations de cisaillement transverse (interpolation mixte)
- Assumed Natural coordinate Strain element (ANS) : 4 points de Gauss dans le plan de la coque pour toutes les composantes de déformation et une interpolation différente pour l'évaluation des déformations en cisaillement transverse
- Intégration réduite (Reduce Integration=RI) : un seul point d'intégration au centre de l'élément est utilisé pour toutes les composantes

Verrouillage en cisaillement transverse (FI et SRI)

- Les éléments coques utilisant une interpolation bilinéaire avec intégration complète sont affectés par le verrouillage en cisaillement transverse
- Incapacité de reproduire un essai de flexion simple
- Les composantes de cisaillement transverse ne sont pas nulles dans ce cas précis (sauf au centre de gravité ...)
- Cela mène à une augmentation de la raideur de l'élément et donc à appauvrir les résultats (incohérences des déformations et contraintes)

➤ Plusieurs possibilités pour éviter ce problème

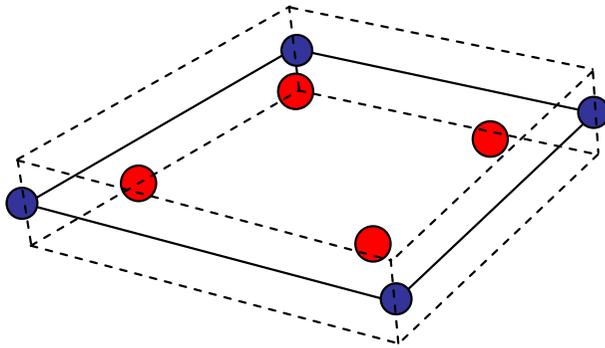
- Utilisation d'une interpolation cubique pour la déflexion
- Utilisation des éléments à intégration ANS : éléments FI + interpolation différente pour les composantes de cisaillement transverse
- Le meilleur moyen est d'utiliser des éléments sous-intégrés (RI) permettant de restreindre le calcul des déformations au centre de l'élément et dans le cas d'un essai de flexion pure le cisaillement transverse est nul

➤ Autres avantages liés à la sous-intégration en explicite

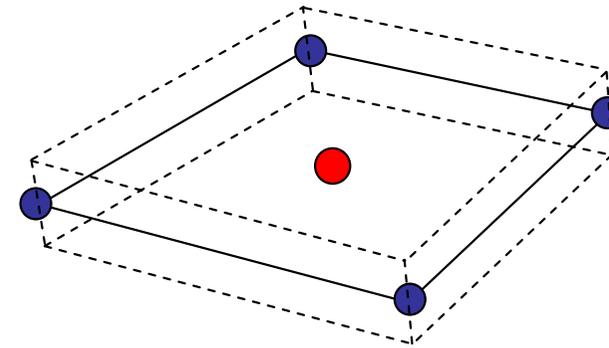
« Les temps de cycles en dynamique transitoire explicite sont proportionnels aux nombres de points d'intégration »

Sous-intégration vs intégration complète

« Les temps de cycles en dynamique transitoire explicite sont proportionnels aux nombres de points d'intégration »



Intégration complète
4 points dans le plan milieu



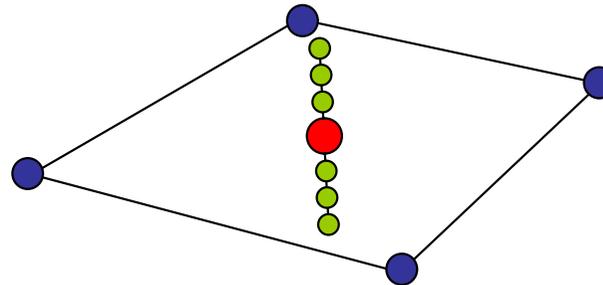
Sous intégration
1 point dans le plan milieu

- La position des points d'intégration dans le plan est donnée par la règle d'intégration discrète de Gauss

$$\int_0^1 f(x) dx = \sum_{i=1}^n w_i f(x_i)$$

Intégration dans l'épaisseur

- Pour prendre en compte les contraintes dans l'épaisseur, on utilise des points d'intégration dans l'épaisseur

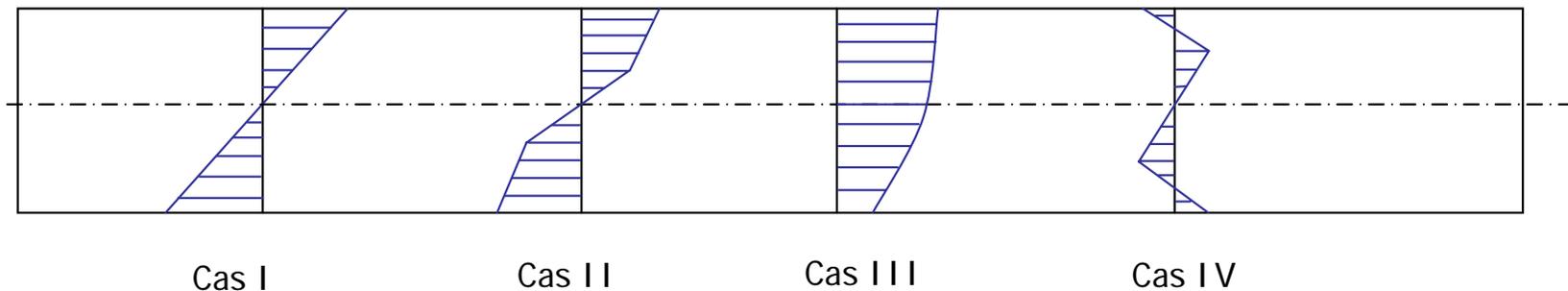


- 4 règles d'intégration sont proposées : Gauss, Trapèze (peu recommandée), Gauss-Lobatto et une règle utilisateur (souvent utilisée pour les matériaux composites...)
- Il est possible d'utiliser jusqu'à 10 points d'intégration avec les règles de Gauss et du trapèze
- Illimité avec la règle utilisateur, on peut donc introduire la valeur des poids et des positions des règles de Gauss avec la règle utilisateur (le site www.wolfram.com permet de les calculer)
- La règle de Lobatto-Gauss est très souvent utilisée (souvent en mise en forme : retour élastique)
- Cette règle permet de connaître la valeur des variables sur la fibre supérieure et inférieure

$$\int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} f(z) dz = w_1 f\left(-\frac{t}{2}\right) + w_n f\left(\frac{t}{2}\right) + \sum_{i=2}^{n-1} w_i f(z_i)$$

Choix du nombre de points d'intégration dans l'épaisseur (1)

- Le choix du nombre de points d'intégration dépend du degré d'influence des informations dans l'épaisseur
- Dans le cas de la mise en forme, la répartition des contraintes dans l'épaisseur n'est pas triviale.
- Il vient alors la nécessité d'introduire un nombre important de points dans l'épaisseur pour capter la répartition des contraintes



Cas I : Flexion pure élastique (NIP=2)

Cas II : Flexion élastique et plastique (NIP \geq 3)

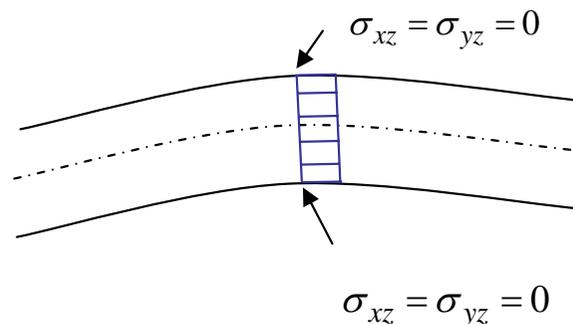
Cas III : Flexion et étirement (tension) (NIP \geq 3)

Cas IV : Après retour élastique (NIP \geq 5,7)

- Dans la majeure partie des études 3 points d'intégration dans l'épaisseur sont suffisants
- En dynamique rapide : 3 à 5 points
- En mise en forme : 3 à 5 points pour la formabilité et 5 à 7 pour le retour élastique

Facteur de correction en cisaillement transverse

- Dans le cas des coques, la théorie de Mindlin (Interpolation au premier ordre des déformations de cisaillement transverse) suppose une répartition constante des contraintes de cisaillement transverse dans l'épaisseur de la plaque
- Ceci est en contradiction avec la condition de contraintes de cisaillement nulles sur les surfaces libres



- Reissner-Mindlin : Variation parabolique de la distribution des contraintes de cisaillement
- On introduit alors un facteur corrigeant les hypothèses
- Reissner-Mindlin proposent $\kappa = \frac{5}{6}$ pour un matériau isotrope (SHRF dans *SECTION_SHELL)
- Dans le cas des matériaux composites (stratifiés), cette théorie n'est pas valable
- Les modèles de composites dans LS-Dyna utilisent pour la plupart la théorie des coques stratifiées permettant de corriger ce problème

Mise en œuvre du choix des éléments de coques

```
*SECTION_SHELL
$  sid  elform  shrf  nip  propt  qr/irid  icomp
   1    2    0.83   5.0
$  t1    t2    t3    t4  nloc
```

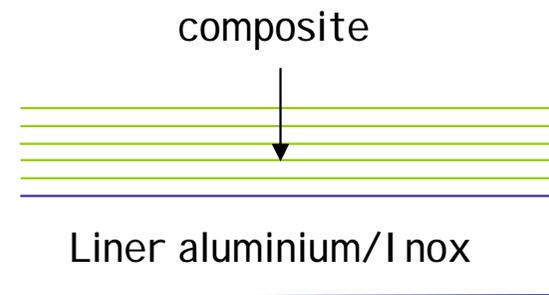
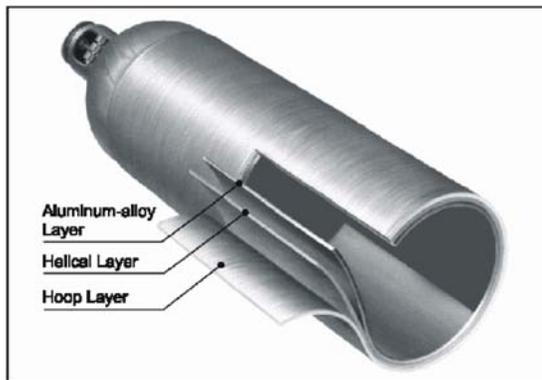
- On définit un type de coque identifié par SID=1
- On choisit la formulation d'élément de Belytschko-Tsay (elform=2)
- Un coefficient de correction en cisaillement transverse de 0.83 (=5/6)
- 5 points d'intégration dans l'épaisseur
- Les épaisseurs nodales (t1,t2,t3,t4)
- Les autres options seront détaillées par la suite

```
*CONTROL_SHELL
$  WRPANG  ESORT  IRNXX  ISTUPD  THEORY  BWC  MITER  PROJ
   20.0    2    -1    1    2    2    2    0
```

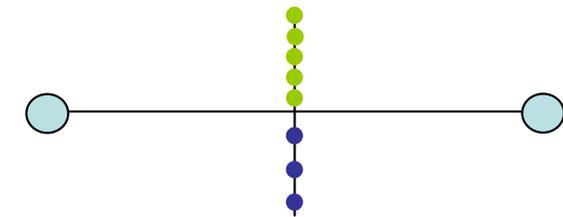
- ESORT=2 : Les déformations de membrane entraînent un amincissement
- MITER : Pour certaines lois de comportement (dont la plus utilisée MAT_24), il existe trois méthodes de résolution de la plasticité - (1) Méthode de la sécante (Par défaut car plus rapide), (2) Retour radial itératif (en principe le plus précis et le plus rigoureux) et (3) retour radial non itératif (ne surtout pas utiliser)

Intérêts de la règle d'intégration utilisateur

- Cette règle permet de rentrer les poids et la position des points d'intégration dans l'épaisseur
- Elle est souvent utilisée pour modéliser les composites (une position correspondante à une couche)
- Un avantage considérable est de pouvoir définir plusieurs matériaux par couches
- Exemple « labo » : Stockage hydrogène



Élément de coque avec règle d'intégration utilisateur



- Problème de la modélisation : interface de contact entre composite et liner non prise en compte
- Avantages : permet de mettre en données rapidement le problème
- Objectifs : calcul de résistance et explosion du liner
- Autres exemples : composite + piezoélectrique, composite + AMF ...

Mise en œuvre de la règle utilisateur

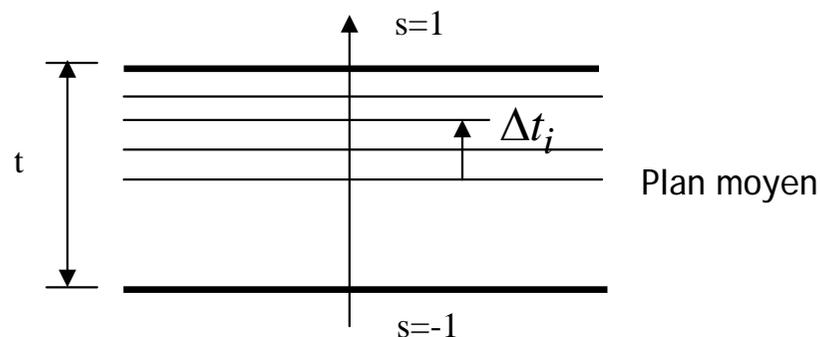
```
*INTEGRATION_SHELL
```

```
$ IRID NIP ESOP
```

```
$SI ESOP=0
```

```
$ S WF PID
```

- ESOP = 1 : Répartition égale dans l'épaisseur divisée en NIP couche
- ESOP = 0 : Définition manuelle des positions dans l'épaisseur (S) et des poids (WF). On associe à chaque point une pièce (donc un matériau)
- ESOP=0 est le seul moyen de définir un matériau différent pour une coque
- Les positions sont normées entre -1 et 1

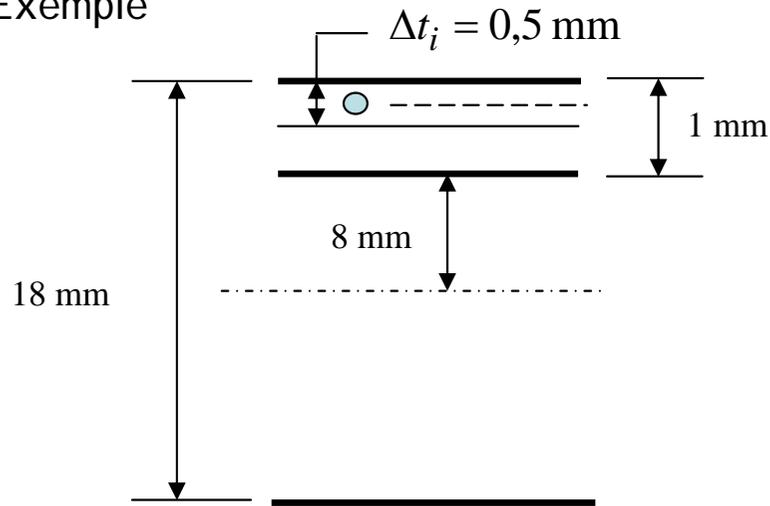


$$s = \frac{(\text{Position en z global du PI} - \text{Position de la surface moyenne})}{\left(\frac{\text{épaisseur}}{2}\right)}$$

$$w_f = \frac{\Delta t_i}{t}$$

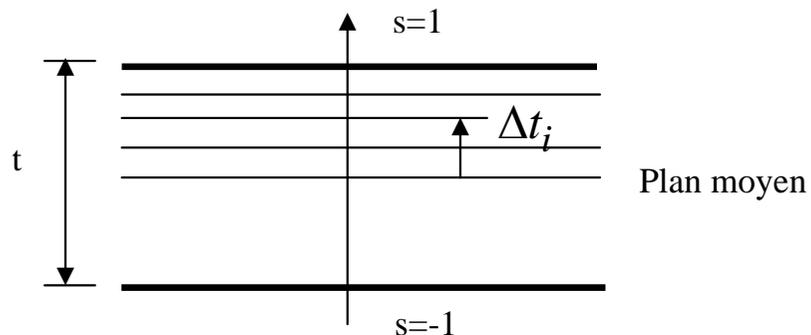
Mise en œuvre de la règle utilisateur

• Exemple



$$s = \frac{(8,75 - 0)}{\left(\frac{18}{2}\right)} = 0.9722$$

$$w_f = \frac{0,5}{18} = 0.0277$$

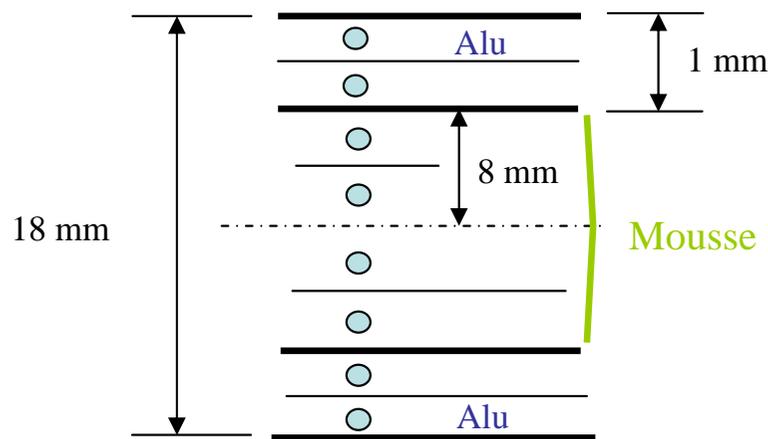


$$s = \frac{(\text{Position en z global du PI} - \text{Position de la surface moyenne})}{\left(\frac{\text{epaisseur}}{2}\right)}$$

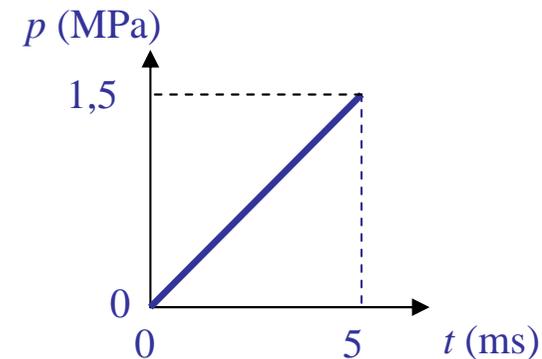
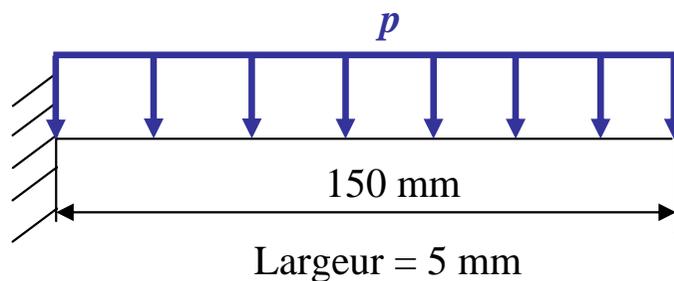
$$w_f = \frac{\Delta t_i}{t}$$

Applications de la règle utilisateur

• Exemple



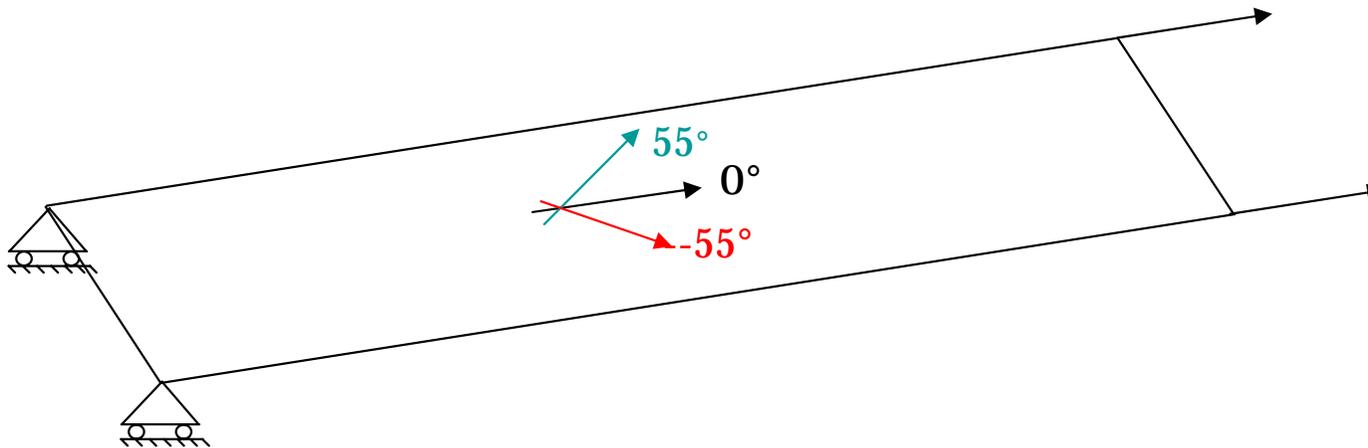
IP	si	wfi	PID
1	-0,9722	0,02778	1
2	-0,9167	0,02778	1
3	-0,6667	0,22222	2
4	-0,2222	0,22222	2
5	0,2222	0,22222	2
6	0,6667	0,22222	2
7	0,9167	0,02778	3
8	0,9722	0,02778	3



- Dans cet exemple, on considère le comportement de la mousse et de l'aluminium comme élastique
- Le fichier UI test.dyn présente la mise en donnée du problème
- Le fichier solid8.k donne la modélisation du problème en 3D

Applications pour les composites (1)

- Essais de traction simple sur un composite $[0, \pm 55^\circ]$



- Définition de l'orientation de chaque couche
- Définition des orientations des couches dans la formulation d'élément

*SECTION_SHELL

\$ sid elform shrf nip propt qr/irid icomp

1 2 0.83 5.0 1.0

\$ t1 t2 t3 t4 nloc

\$ beta1 beta2 beta3 beta4 beta5 beta6 beta7 beta8

Applications pour les composites (2)

- Loi matériau : Comportement élastique orthotrope avec dépendance à la température
- Définition du repère de référence et rotation du repère local d'un angle BETA (voir *SECTION_SHELL)

```
*MAT_TEMPERATURE_DEPENDENT_ORTHOTROPIC
$ MID RO AOPT REF
1,1.949e-9,3
$ XP YP ZP A1 A2 A3

$ V1 V2 V3 D1 D2 D3 BETA
1.0,0.0,0.0
$ EA EB EC PRAB PRCA PRCB
3.9e4,1.1e4,1.1e4,9.87e-2,9.87e-2,0.25
$ AA AB AC GAB GBC GCA Ti
4e-6,28e-6,28e-6,3.24e3,4.4e3,3.24e3,150.0
$ EA EB EC PRAB PRCA PRCB
3.9e4,1.1e4,1.1e4,9.87e-2,9.87e-2,0.25
$ AA AB AC GAB GBC GCA Ti
4e-6,28e-6,28e-6,3.24e3,4.4e3,3.24e3,0.
```

- Implanter le comportement et la formulation d 'élément dans le fichier comtract.dyn
- Lancer le calcul

Choix d'un élément de coques

- Le choix d'un élément est basé sur des considérations géométriques **et** de formulation,
- La majeure partie sont des éléments sous-intégrés sauf les formulations 9,16,18,19,20
- L'élément 2 (Belytschko-Tsay) est l'élément de référence en explicite
- Cet élément est le plus rapide
 - ✓ Il fonctionne comme une plaque, il est insensible au verrouillage et continu de fonctionner même pour d'importantes distorsions
 - ✓ C'est l'élément de référence en crash et pour la majeure partie des études
 - ✓ Il supporte très mal des sollicitations en torsion
- La majeure partie de ces éléments sont des quadrangles sauf 3,4,17,18,20
- Lorsque l'on définit un triangle avec la formulation d'un quadrangle, l'élément est dégénéré (le dernier nœud est dupliqué et la masse répartie est de $2 \times 1/4$)
- Les éléments triangulaires sont plus raides (interpolation linéaire) que les quadrangles mais ils possèdent l'avantage de ne pas solliciter les modes d'hourglass et de ne pas exhiber de vrillage (triangle = 3 points dans un plan)
- L'élément 16 (fast fully integrated) est recommandé en mise en forme (retour élastique)

Les éléments sous intégrés sont donc moins coûteux mais ...

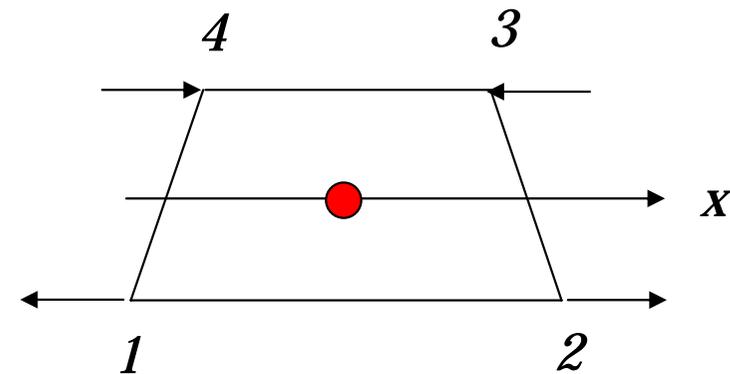
Mode d'Hourglass

Conséquences de la sous-intégration
Les modes d'Hourglass
(Modes à énergie de déformation nulle)
-
Contrôles de ces modes

Modes à énergies de déformations nulles : Hourglass

- Le champs des vecteurs vitesses d'un élément peut être représenté dans une base 4D et décomposé selon : un déplacement de corps rigide, une tension-compression, un cisaillement pur et un mode d'hourglass (ou flexion dans le plan)

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{pmatrix} = \dot{x}_{rb} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} + \dot{x}_{tc} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix} + \dot{x}_{ss} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \end{pmatrix} + \dot{x}_{hour} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix}$$



- En projetant les vecteurs des vitesses nodales, on obtient une composante des vitesses d'hourglass non nulle.
- Il est alors aisé de démontrer que la déformation est nulle.

$$\dot{\epsilon}_{xx} = \frac{\partial \dot{x}}{\partial x} = \sum_{i=1}^4 \frac{\partial N_i}{\partial x} \dot{x}_i \Rightarrow \dot{\epsilon}_{xx} = \frac{1}{x_2 y_3} [(y - y_3)\dot{x}_1 - (y - y_3)\dot{x}_2 + y\dot{x}_3 - y\dot{x}_4]$$

Modes d'hourglass : Contrôle

- Pour des éléments sous intégrés, l'unique PI se trouve au centre de gravité : $y=y_3/2$

$$\dot{\epsilon}_{xx} = \frac{y_3}{2x_2 y_3} [-\dot{x}_1 + \dot{x}_2 + \dot{x}_3 - \dot{x}_4] = 0$$

- Lors de la sous intégration, on fait alors apparaître des modes purement numériques : les modes d'Hourglass (de sablier)
- Il en existe 6 (autant que de degrés de libertés) et s'ils prédominent, ils viennent perturber la solution qui devient irréaliste.
- Il faut tenter d'éliminer ces modes parasites,
- En pratique, on ne peut pas totalement les éliminer. On les contrôle ...
- Pour cela, on ajoute des efforts nodaux permettant de s'opposer au déplacement

Modes d'hourglass : Contrôle

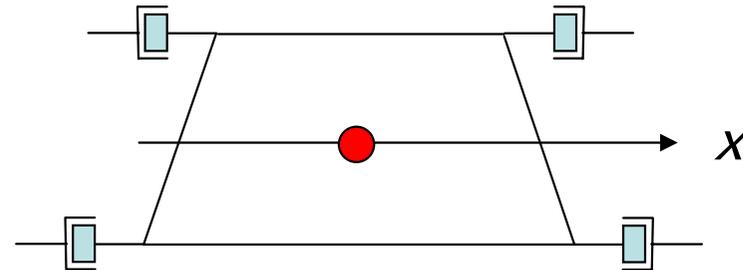
- Méthode 1 : Viscous Hourglass Control – Contrôle Visqueux (hautes vitesses et mousses)

On considère aux nœuds des amortisseurs visqueux

$$\begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{pmatrix} = -h_m a \dot{x}_{hs} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

Coefficient de pénalisation à rentrer

$$a = \frac{c\rho}{4} (tA)^{2/3} : \text{viscosité (Ns/m)}$$

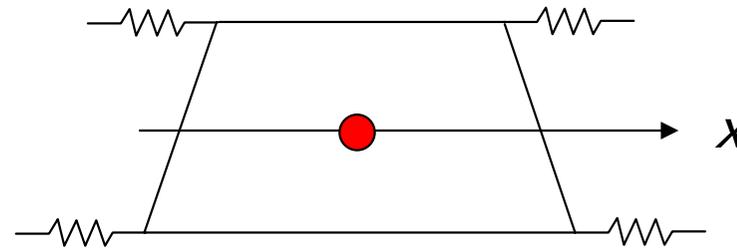


Modes d'hourglass : Contrôle

- Méthode 2 : Stiffness hourglass forces (basses vitesses et pas pour les mousses)

On considère des ressorts aux noeuds

$$\begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{pmatrix} = -h_m \frac{Et}{8} \int \dot{x}_{hs} dt \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix}$$



Raideur linéique : N.m⁻¹

Coefficient de pénalisation

Modes d'hourglass : Contrôle

- Les modes d'Hourglass ne peuvent être que contrôlés et il faut s'assurer qu'ils sont négligeables vis-à-vis de la physique

$$\frac{Energie_{hs}}{Energie_{int}} \leq \lambda \approx 0.1$$

- Il est donc nécessaire d'inclure dans le bilan des efforts, les termes relatifs à l'hourglass (même s'ils doivent être négligeables)
- Le meilleur moyen d'éviter l'hourglass est de raffiner le maillage ou d'utiliser des éléments à intégration complète
- Le contrôle de l'hourglass peut se faire par la mise en place de la carte (valeur générale)

*CONTROL_HOURGLASS

```
$  IHQ    QH  
   4    0.03
```

Mise en œuvre du contrôle de l'hourglass

- Le contrôle de l'hourglass se fait plus habituellement par la mise en place de la carte (par pièce)

*HOURGLASS

```
$  HGID  IHQ    QH
      1    4    0.10
```

*PART

\$HEADING

POUTRE

```
$  PID  SECID  MID  EOSID  HGID  GRAV  ADPOPT  TMID
      1    1    1      1      1    0    0
```

- Pour les coques

I HQ = 0,1,2 ou 3 : Hourglass visqueux

I HQ = 4 ou 5 : Hourglass en raideur

I HQ = 8 : Pour l'élément 16 uniquement

- Pour les éléments volumiques

I HQ = 0,1 : Hourglass visqueux (ne pas utiliser)

I HQ = 2,3 : Hourglass visqueux (recommandé en hautes vitesses)

I HQ = 4,5 : Hourglass en raideur (à éviter or c'est l'option par défaut!)

I HQ = 6 : Hourglass en raideur (meilleur à basse vitesse)

Mise en œuvre du contrôle de l'hourglass

- Le coefficient d'hourglass $QH=0.1$ est une bonne valeur pour l'hourglass visqueux (0,1,2 et 3)
- Dans le cas de l'hourglass en raideur cette valeur doit être diminuée ($Qh=0.05$ ou 0.03)
- Dans le cas des mousses et en vitesses rapides : Hourglass visqueux
- Dans le cas des mousses : introduire l'algorithme de Bulk Viscosity (propagation de chocs)
- Pour les basses vitesses et en crash automobile ($Qh=0.05$): Hourglass en raideur
- Dans le cas des éléments volumiques avec $IHQ=6$: hourglass en raideur avec correction de la raideur en flexion (hourglass dit physique car basé sur la loi de comportement utilisée)
- Dans le cas des coques : hourglass visqueux et en raideur semblent équivalent

Le meilleur moyen d'éviter les modes d'hourglass est de raffiner le maillage

- Applications : Hourglass.dyn et Hourglass2.dyn

Algorithmes de contact

Algorithme de pénalité
Choix du type de contact
Choix et réglages des paramètres
associés aux algorithmes de contacts

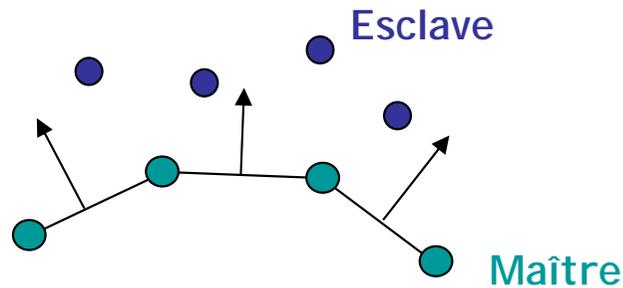
Contact : théorie

- Dans Dyna, il existe 4 algorithmes de contact
- Algo 1: Pénalisation (la majeure partie des simulations)
- Algo 2: Soft constraint (Contact entre des pièces de raideurs très différentes : acier/mousse)
- Algo 3 : Pinball (trop complexe pour en faire un exposé détaillé)
- Algo 4 : Algorithmes de contraintes cinématiques (CONTACT_TIED)

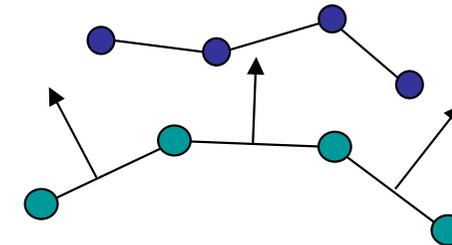
Algorithme de pénalisation : J. O. Hallquist (1976)

Contact : Méthodes de recherche

- NODE_TO_SURFACE

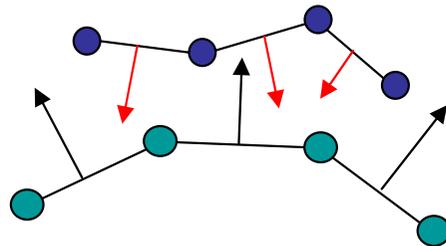


- ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE

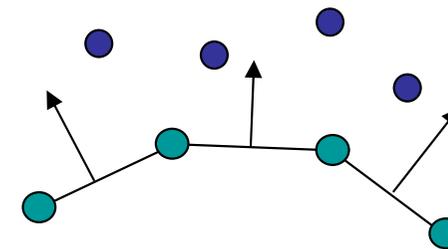
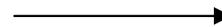
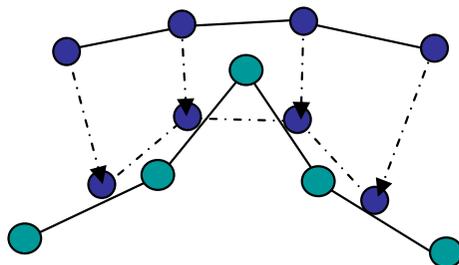


Même subroutine que node_to_surface (mais avec lissage des normales)

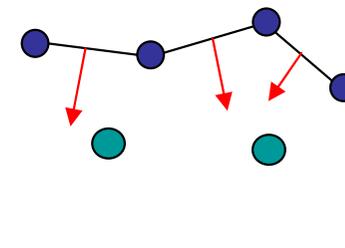
- SURFACE_TO_SURFACE



Pour éviter



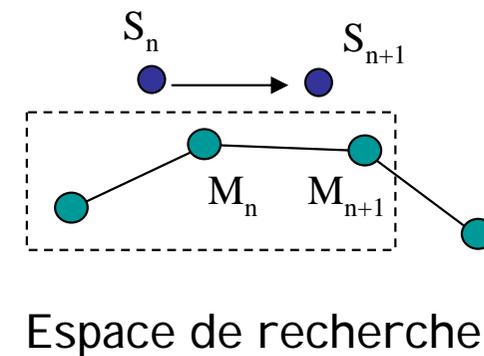
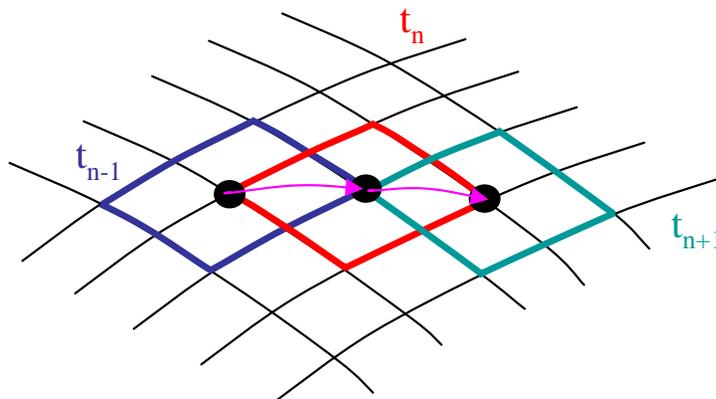
+



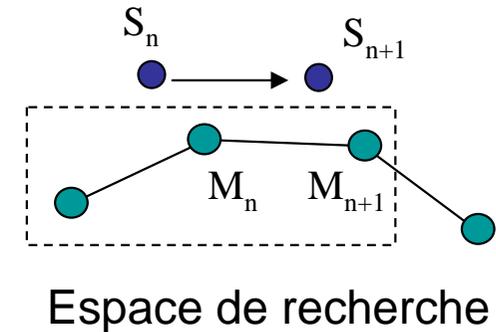
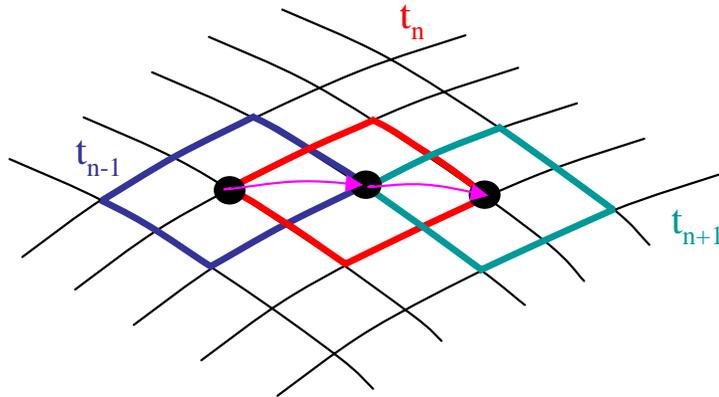
Traitement symétrique (double du temps)

Contact : Méthodes de recherche globales et locales

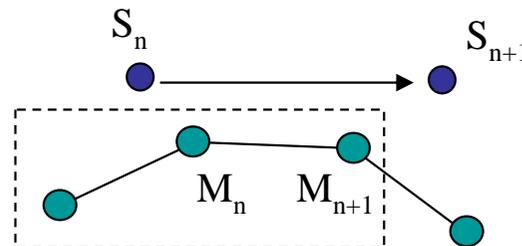
- Pour chaque nœud esclave, on recherche le nœud maître le plus proche
- Méthode brutale : recherche de la distance des nœuds esclaves avec tout les nœuds maîtres et prendre le minimum
- Cette méthode est trop coûteuse (Tps CPU proportionnel à (Nb Nœuds Esclaves)²)
- Méthode incrémentale (Tps CPU proportionnel à Nb Nœuds Esclaves)
 - ✧ A l'initialisation, on utilise la méthode brutale pour connaître le voisin initial
 - ✧ Pendant le calcul, on se limite à l'environnement topologique au pas de temps du nœud M_n



Contact : Méthodes de recherche globales et locales



- Un problème peut se poser dans le cas de grands déplacements :

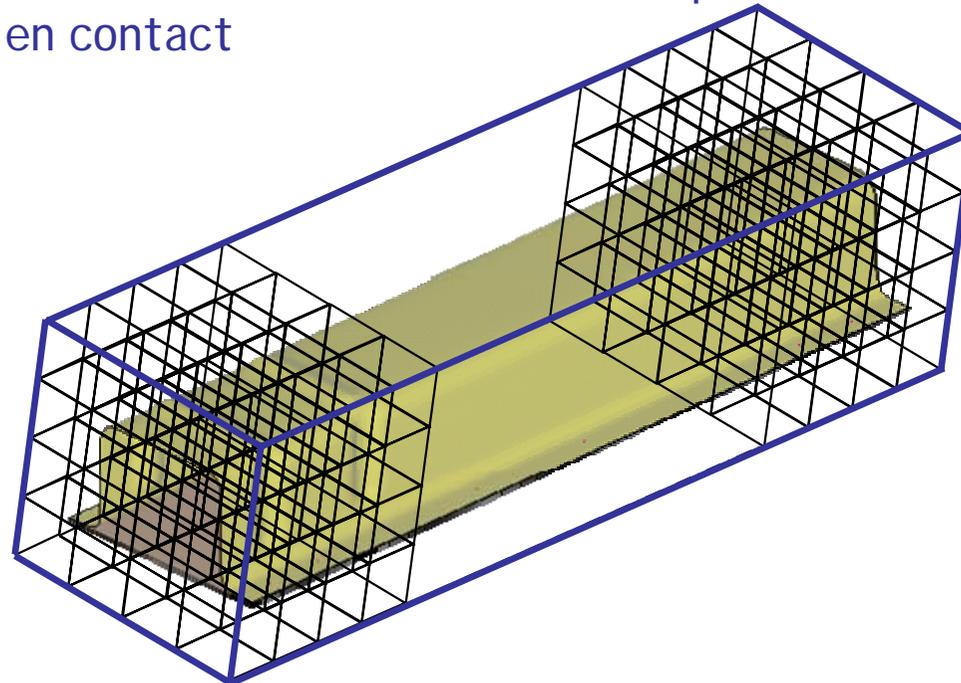


- En pratique (en explicite) : $d = v\Delta t > l = c\Delta t \Rightarrow v > c$ (impossible)
- Exemple d' une coque en acier se déplaçant à une vitesse de 15 m/s

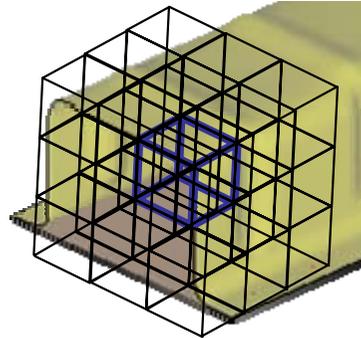
$$d = 0.015 \text{ mm}$$

Contact : Méthodes de recherche globales

- Dans les derniers algorithmes de contact introduit dans Dyna (`_AUTOMATIC_`), la méthode dite de Bucket Sort est employée en remplacement de la méthode brute + incrémentale pour définir les nœuds maîtres et esclaves susceptibles d'être en contact
- La méthode consiste à définir une boîte 3D englobant l'intégralité du modèle
 - ✧ A l'initialisation, on définit une boîte 3D englobant l'intégralité du modèle
 - ✧ Ensuite, on discrétise la boîte à l'aide de cubes (buckets = paniers)
 - ✧ Dans chaque panier et dans ces 26 voisins, on repère les nœuds esclaves et maîtres susceptibles d'être en contact



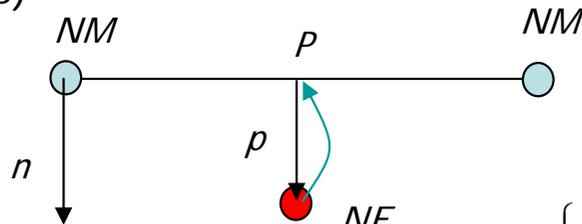
Contact : Méthodes de recherche globales



- Cette méthode est employée dans les contacts automatiques
- La fréquence du tri est donnée par la variable BSORT (Bucket sorting)
- Elle dépend du type de contact, des conditions de simulations (vitesses) et de la régularité du maillage
- La méthode incrémentale est toujours utilisée pour connaître les pénétrations

Contact par pénalité : théorie

- On recherche pour chaque nœud esclave si géométriquement, ils ont pénétré dans un élément maître
- Dans le cas positif, on calcul la pénétration p (distance projetée le long de la normal de l'élément maître)

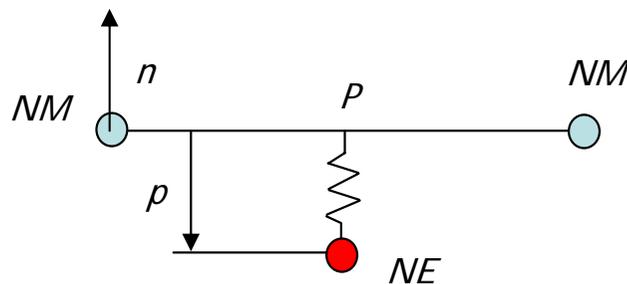


$$\vec{n} \cdot \vec{PNE} \begin{cases} \geq 0 \Rightarrow p = 0 \\ < 0 \Rightarrow p = |\vec{n} \cdot \vec{PNE}| \end{cases}$$

- On projette alors le NE sur l'élément maître
- Et on calcul l'effort de contact résultant

Oui, mais comment ?

- La prise en compte des efforts de contact est réalisée en ajoutant des éléments spécifiques : des ressorts ne fonctionnant qu'en traction



- L'effort de contact est alors calculé par

$$\vec{f}_c = kp \cdot \frac{\vec{PNE}}{\|\vec{PNE}\|} > 0$$

- Il est alors réparti aux nœuds maîtres voisins pour équilibrer la structure $\vec{f}_{ci} = -N_i(P) \cdot \vec{f}_c \Rightarrow \sum_{i=1,4} \vec{f}_{ci} = -\vec{f}_c$

Oui, mais que vaut la raideur k de nos ressorts de contact ?

Contact : Définition de la pénalité

- La raideur des ressorts de contact est le produit d'un facteur de pénalisation (Sans dimensions) et d'une raideur déterminée par la pièce maîtresse, le nœud esclave ou le minimum des deux (*CONTROL_CONTACT)

- Pour une coque

$$k = sK \frac{A}{\max(D_1, D_2)}$$

s est le coefficient de pénalisation

K : module d'incompressibilité

A : Aire

D_i : Longueurs des diagonales

V : Volume

- Pour un élément brique

$$k = sK \frac{A^2}{V}$$

- En principe, la valeur de k doit être très grande pour éviter les pénétrations et représenter la réalité
- En pratique k est limité par la condition de stabilité (qui n'est pas calculée par le code dans le cas des éléments de contact !!!!)

$$\Delta t_c = \sqrt{\frac{4m_e m_m}{k(m_e + m_m)}}$$

- Cette valeur est estimée pendant l'initialisation (d3hsp) : « ...timestep should not exceed ... »

Contact : Définition de la pénalité

- Pour garantir la stabilité, l'utilisateur devra s'assurer de la condition suivante

$$\min_{contact} (\Delta t_c) \geq \Delta t$$

- Par défaut $s=0.1$, cela correspond à un coefficient de pénalisation optimisé lors d'un impact de 2 coques avec le même matériau et la même taille d'élément ...
- Si on ne vérifie pas la condition de stabilité, la physique devient instable et donne des résultats faux
- Il faut donc faire extrêmement attention au contact
- Le bilan des efforts doit donc faire apparaître les efforts de contact

On va démontrer l'importance des paramètres de contrôle du contact ainsi que de la gestion de ces paramètres

Contact : Définition des paramètres globaux

*CONTROL_CONTACT

\$	SLSFAC	RWPNAL	ISLCHK	SHLTHK	PENOPT	THKCHG	ORIEN		
	.100	.000	2	1	1	0	1		
\$	USRSTR	USRFAC	NSBCS	INTERM	XPENE	SSTHK	ECDT	TIEDPRJ	
	0	0	10	0	4.000	0			

- SLSFAC : Valeur du coefficient de pénalisation global (s=0.1)
- ISLCHK : Recherche des pénétrations initiales
- SHLTHK : Prise en compte (ou non) de l'épaisseur des coques (déformables et/ou rigides)
- PENOPT : Choix de la règle à appliquer pour le calcul de la pénalité
- THKCHG : Prise en compte (ou non) de la variation d'épaisseur
- ORIEN : Réorientation automatique des normales
- XPENE : On verra plus tard

Contact : Définition des paramètres globaux

```
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE
$      CID      CONTACT INTERFACE TITLE
$      5      BLANK/LOWER RING
$      SSID      MSID      SSTYP      MSTYP      SBOXID      MBOXID      SPR      MPR
$      1      2      3      3
$      FS      FD      DC      V      VDC      PENCHK      BT      DT
$      SFS      SFM      SST      MST      SFST      SFMT      FSF      VSF
$      SOFT      SOFSCL      LCIDAB      MAXPAR      PENTOL      DEPTH      BSORT      FRCFRQ
$      PENMAX      THKOPT      SHLTHK      SNLOG
```

- SSID (Slave Segment Identity) : Numéro de la pièce esclave (ensemble de pièces, nœuds ou faces)
- MSID (Master Segment Identity) : Numéro de la pièce maîtresse (ensemble de pièces, nœuds ou faces)
- SSTYP : Type d'esclave (Pièce, ensemble de pièce, ensemble de nœuds ou de faces)
- MSTYP : Type de maître (Pièce, ensemble de pièce, ensemble de nœuds ou de faces)
- SBOXID : Boite esclave permettant de désigner une zone de contact sur l'esclave (N° de boite)
- MBOXID : Boite maîtresse permettant de désigner une zone de contact sur le maître (N° de boite)
- SPR et MPR : Sauvegarde dans la base de données (pas trop d'intérêt)

Contact : Définition des paramètres globaux

*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE

```

$      CID      CONTACT INTERFACE TITLE
$      5      BLANK/LOWER RING
$      SSID      MSID      SSTYP      MSTYP      SBOXID      MBOXID      SPR      MPR
$      1      2      3      3
$      FS      FD      DC      VC      VDC      PENCHK      BT      DT
$      SFS      SFM      SST      MST      SFST      SFMT      FSF      VSF
$      SOFT      SOFSCL      LCIDAB      MAXPAR      PENTOL      DEPTH      BSORT      FRCFRQ
$      PENMAX      THKOPT      SHLTHK      SNLOG
    
```

$$\mu_c = F_D + (F_S - F_D)e^{-DC \cdot |v_{ref}|}$$

- VC : Coefficient de frottement visqueux pour limiter l'effort de frottement maximum $VC = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}}$
- VDC : Coefficient d'amortissement visqueux pour éliminer les instabilités de contact (très utilisé en mise en forme : VDC=20)
- PENCHK : Recherche des pénétrations initiales
- BT : Temps de début de prise en compte du contact
- DT : Temps de fin de prise en compte du contact

Contact : Définition des paramètres globaux

```
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE
$      CID      CONTACT INTERFACE TITLE
$      5      BLANK/LOWER RING
$      SSID      MSID      SSTYP      MSTYP      SBOXID      MBOXID      SPR      MPR
$      1      2      3      3
$      FS      FD      DC      VC      VDC      PENCHK      BT      DT
$      SFS      SFM      SST      MST      SFST      SFMT      FSF      VSF
$      SOFT      SOFSCL      LCIDAB      MAXPAR      PENTOL      DEPTH      BSORT      FRCFRQ
$      PENMAX      THKOPT      SHLTHK      SNLOG
```

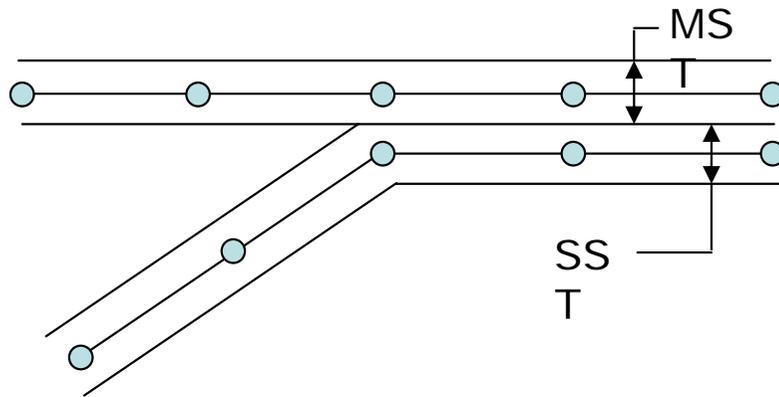
- SFS : Facteur d'échelle du coefficient de pénalisation de l'interface esclave (Par défaut=1.0)
- SFM : Facteur d'échelle du coefficient de pénalisation de l'interface maître (Par défaut=1.0)
- **SI** PENOPT=1 dans *CONTROL_CONTACT

$$s = SLSFAC \times \min[SFS, SFM]$$

- SST : Épaisseur de contact sur l'esclave
- MST : Épaisseur de contact sur le maître
- Si SST=MST=0, on considère l'épaisseur définie dans la carte *SECTION_SHELL

Contact : épaisseurs de contact

Exemple des tombages de bord



- Avec une modélisation coque, on modélise la fibre neutre
- Pour rendre compte de la rigidité de la structure, il est nécessaire de rendre compte de l'épaisseur physique en contact
- Néanmoins, on peut voir apparaître des pénétrations initiales
- On peut alors modifier les épaisseurs de contact SST et MST
- Soit les recalculer avec les coefficients SFST et SFMT

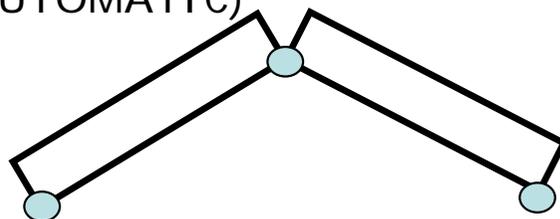
- La première solution est de définir les épaisseurs réelles SST e MST et de définir un coefficient SFST=SFMT=0.9
- La seconde (dans le cas des contacts _AUTOMATIC_) est de définir les épaisseurs physiques, SFST=SFMT=1.0 et d'utiliser le mot IGNORE=1 (élimination automatique des pénétrations initiales)

Contact : Paramètres optionnels (Carte A)

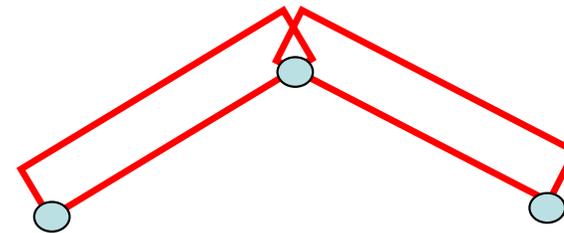
```
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE
$      CID      CONTACT INTERFACE TITLE
$      5      BLANK/LOWER RING
$      SSID      MSID      SSTYP      MSTYP      SBOXID      MBOXID      SPR      MPR
$      1      2      3      3      VDC      PENCHK      BT      DT
$      FS      FD      DC      VC
$      SFS      SFM      SST      MST      SFST      SFMT      FSF      VSF
$      SOFT      SOFSCL      LCIDAB      MAXPAR      SBOPT      DEPTH      BSORT      FRCFRQ
$      PENMAX      THKOPT      SHLTHK      SNLOG
```

- SOFT : Choix du type d'algorithme - 1. Pénalité, 2. Soft Constraint, 3. Pinball, 4. Ancien algorithme de pénalité

- MAXPAR : facteur d'extension permettant de refermer le jeu entre deux coques (pas utilisé dans les contacts `_AUTOMATIC`)



MAXPAR=1.0



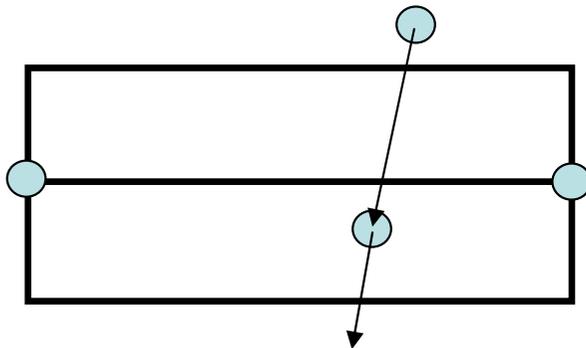
MAXPAR=1.2

- BSORT : Nombre de cycles pour le Bucket Sort (`_AUTOMATIC` uniquement)

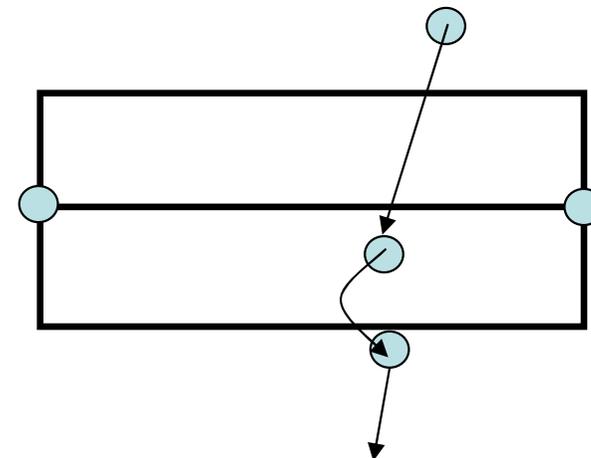
Contact : Paramètres optionnels (Carte B)

```
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE
$      CID      CONTACT INTERFACE TITLE
$      5      BLANK/LOWER RING
$      SSID      MSID      SSTYP      MSTYP      SBOXID      MBOXID      SPR      MPR
$      1      2      3      3      VDC      PENCHK      BT      DT
$      FS      FD      DC      VC
$      SFS      SFM      SST      MST      SFST      SFMT      FSF      VSF
$      SOFT      SOFSCL      LCIDAB      MAXPAR      SBOPT      DEPTH      BSORT      FRCFRQ
$      PENMAX      THKOPT      SHLTHK      SNLOG
```

- SNLOG (Shooting nodes logic) : permet de générer une énergie supplémentaire dès le premier pas de temps



SNLOG=1



SNLOG=0

Contact : Paramètres optionnels (Carte C)

```

*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE
$      CID      CONTACT INTERFACE TITLE
$      5      BLANK/LOWER RING
$      SSID      MSID      SSTYP      MSTYP      SBOXID      MBOXID      SPR      MPR
$      1      2      3      3
$      FS      FD      DC      VC      VDC      PENCHK      BT      DT
$      SFS      SFM      SST      MST      SFST      SFMT      FSF      VSF
$      SOFT      SOFSCL      LCIDAB      MAXPAR      SBOPT      DEPTH      BSORT      FRCFRQ
$      PENMAX      THKOPT      SHLTHK      SNLOG
$      IGAP      IGNORE
  
```

- I IGNORE : Permet d'ignorer les pénétrations initiales (_AUTOMATIC_ seulement)
- I IGNORE = 1 : Laisse les pénétrations initiales (Précontraintes)
- I IGNORE = 2 : Projete les nœuds initialement pénétrés sur la surface

Contact entre pièces de raideurs différentes (SC)

- Utilisation de l'algorithme d'adoucissement contraint (Soft Constraint)
- Dans le cas où des pièces ayant des raideurs très différentes, il est difficile de régler la valeur du facteur de pénalisation et des pénétrations top importantes apparaissent
- En principe, une solution est d'augmenter la valeur du coefficient de pénalisation
- En pratique, une valeur trop importante mène à des instabilités
- Dans le cas de l'algorithme de pénalisation standard, la raideur de contact est indépendante du pas de temps stable global
- Donc dans le cas de matériaux type mousse sur acier, on va utiliser l'algorithme de Soft Constraint basé sur la définition d'une raideur de contact fonction du pas de temps stable et de la masse nodale

$$\Delta t_c = \sqrt{\frac{4m_s m_m}{k(m_s + m_m)}} \Rightarrow \sqrt{\frac{m_{SN}}{k}} = \Delta t \Rightarrow k = \frac{m_{SN}}{\Delta t^2}$$

Contact entre pièces de raideurs différentes (SC)

- On pénalise alors cette relation

$$k = s \frac{m}{\Delta t^2}$$

- Le coefficient s correspond au mot clé SOFSCL dans la carte optionnelle A lorsque SOFT=1

§ SOFT SOFSCL LCIDAB MAXPAR SBOPT DEPTH BSORT FRCFRQ

Contact entre pièces de raideurs différentes (SC)

- En pratique s est compris entre 0.1 et 0.5
- Comme k est calculé à partir du pas de temps donc en principe toujours stable
- Néanmoins, il peut y avoir apparitions d'instabilités

Technique n°1

Pénalité classique : $k_1 = SLSFAC \times SFS \times K \times \frac{A^2}{V}$

Soft Constraint (SOFT=1) : $k_2 = SOFSCCL \times \frac{m_{SN}}{\Delta t^2}$

$$k = \max(k_2, k_1)$$

Il faut donc toujours regarder si $\Delta t_c \geq \Delta t$
sinon Pénalité classique

Technique n°2 (La plus utilisée car plus rapide à mettre en œuvre)

Si SFS et SFM petits (en pratique $1e-4$) : $k_1 < k_2$ **Stabilité du contact**

- Dans le cas où l'utilisation de l'algorithme d'adoucissement continu de mener à des trop grandes pénétrations :
 - Diminuer le pas de temps (raideur proportionnelle à l'inverse du carré du pas de temps)
 - Augmenter le nombre de ressort : raffiner le maillage
 - Sinon les laisser mais dans ce cas la précision des calculs est mauvaise

Les différents types de contacts : applications

*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE

NODES_TO_SURFACE

ONEWAY_

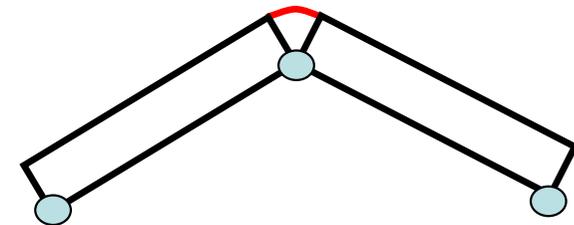
- La majeure partie des études avec contact parfait ou avec frottement

*CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE

- Utilisé pour définir une seule carte pour multi-contact entre toutes les pièces (Crash)

*CONTACT_FORMING_

- Procédés de mise en forme
- Optimisation des normales
- Prises en compte des discontinuités de maillage des outils
- Un contact par outils

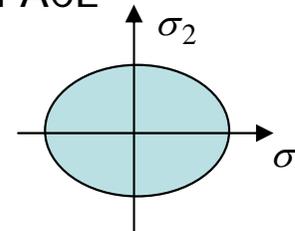


Les différents types de contacts : applications

*CONTACT_TIE_

- On n'utilise ici un algorithme de contraintes cinématiques et non un algorithme de pénalisation
- Permet de lier des pièces ou de définir des contacts avec critères de rupture de liaison
- Modélisation de liaison de type stick and slick (tied puis contact frottant ou parfait)
- Les critères de ruptures de liaisons sont souvent des critères adimensionnels quadratiques
- Ex : CONTACT_TIEBREAK_SURFACE_TO_SURFACE

$$\left(\frac{\sigma_1}{A}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{B}\right)^2 \geq 1$$



*CONTACT_SPOTWELD

- C'est un CONTACT_TIED_ permettant de modéliser les liaisons par soudures
- Il permet de transmettre les efforts dans la liaison
- A utiliser avec les éléments SPOTWELD et MAT_SPOTWELD (Loi de comportement la plus complexe dans DYNA)

Les différents types de contacts : applications

*CONTACT_CONSTRAINT_

- Contraintes de contact : Frottement est une fonction de la pression de contact (par ex)

*_ERODING_

- Critères d'érosion : si efforts et pénétrations dépassent un seuil alors rupture d'éléments

- Utilisé pour pénétration de type projectiles (mais il existe d'autres applications)

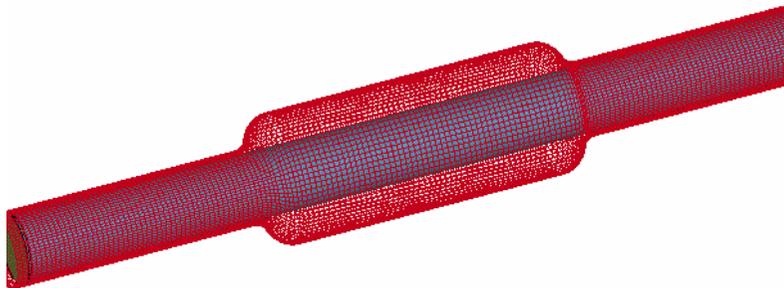
*CONTACT_DRAWBEAD

- Utilisé en mise en forme pour modéliser les joncs de retenus

*_INTERFERENCE_

- Mise en œuvre de liaisons frettées (précontraintes)

Exemples du LMARC

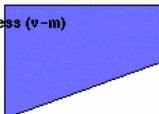


EXPLOSION LINER

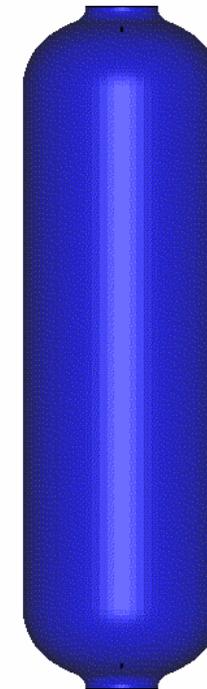
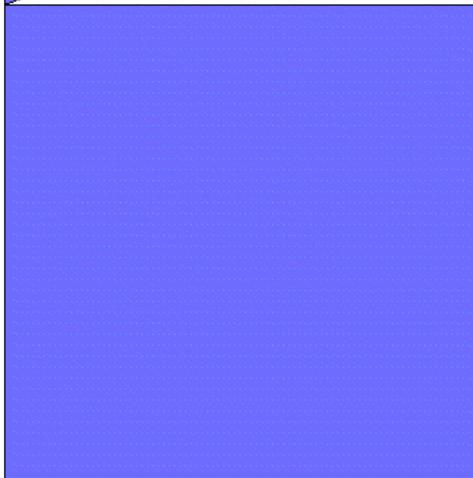
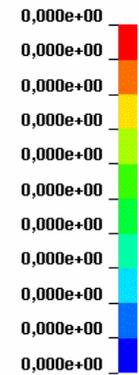
Time = 0
Contours of History Variable #1
max ipt. value
min=1, at elem# 1
max=1, at elem# 1



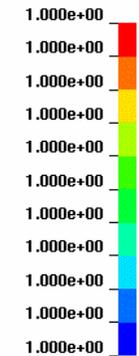
LS-DYNA user input
Time = 0
Contours of Effective Stress (v-m)
max ipt. value
min=0, at elem# 3383
max=0, at elem# 3383



Fringe Levels



Fringe Levels



Applications

- Essai 1 : Influence des paramètres de contact (SFS et SFM)
- Essai 2 : Contact entre tubes élasto-plastiques
- Essai 3 : Surprise
- Essai 4 : Application de l'algorithme de Soft Constraint (écrasement d'une mousse synthétique)

Bilan d'énergie

Bilan d'énergie associé au calcul

Bilan d'énergie

- En plus de l'équilibre, LS-DYNA fait un bilan énergétique (fichier GLSTAT)
- Se fichier doit toujours être sauvegardé, sinon on ne peut pas s'assurer de la validité du calcul (*DATABASE_GLSTAT)
- Par définition, le bilan d'énergie doit faire apparaître

$$\underbrace{E_{\text{int}} + E_K + E_{\text{contact}} + E_{\text{rwall}} + E_{\text{damp}}}_{E_{\text{totale}}} = E_K^0 + E_{\text{int}}^0 + W_{\text{ext}}$$

- Par définition de l'algorithme de pénalisation, l'énergie de contact n'est pas totalement physique
- Il faut vérifier que

$$\frac{E_{\text{contact}}}{E_{\text{int}}} < 5\%$$

Bilan d'énergie

- A cela doit se rajouter l'énergie de hourglass dans le cas des éléments sous intégrés
- Il faut alors que

$$\frac{E_H}{E_{\text{int}}} < 10\%$$

- Dans le cas où une analyse statique est tentée avec un code explicite, il faudra vérifier que

$$\frac{E_K}{E_i} < 5\%$$

Bilan d'énergie

- L'énergie interne fait intervenir l'énergie de déformation élastique et le travail inélastique
- Le travail des efforts extérieurs fait intervenir le travail des efforts extérieurs appliqués, les pressions appliquées ainsi que le travail développé par les conditions aux limites en vitesse, déplacement et accélération
- Par défaut les énergies associées à l'hourglass, l'amortissement (Rayleigh) et les murs rigides ne sont pas calculées
- Afin de l'activer il faut inclure le mot clé *CONTROL_ENERGY et activer le calcul (HGEN=2, RYLEN =2)

Une énergie est toujours positive (intégrale d'un scalaire positif) et par conséquent si le contraire est constaté, quelque chose ne fonctionne pas (ex: si l'énergie de contact est négative, des pénétrations initiales sont effectives et fausses le calcul, Hourglass)

- Dans ce cas, une énergie purement numérique (donc parasite) vient artificiellement s'ajouter à la physique -> Calcul faux

Amortissement

Relaxation dynamique et Amortissement

Amortissement

- Par défaut, LS-Dyna n'introduit pas d'amortissement dans la structure (régime libre)
- Il est possible d'introduire de l'amortissement dans la structure à l'aide du mot clé *DAMPING

*DAMPING_GLOBAL : amortissement global (fréquence propre maximale de la structure)

$$D = 2\omega_{\max}$$

*DAMPING_PART_MASS : amortissement d'une pièce (matrice d'amortissement proportionnelle à la matrice masse)

$$[C] = \alpha [M]$$

*DAMPING_PART_STIFFNESS : amortissement d'une pièce (matrice amortissement proportionnelle à la matrice de raideur)

$$[C] = \beta [K]$$

- Il est possible de coupler les amortissements en raideur et en masse (Rayleigh)

Relaxation dynamique

- On utilise la relaxation dynamique dans deux cas importants : l'initialisation des contraintes et pour la prédiction du retour élastique en explicite (relâchement des contraintes élastiques résiduelles)
- On essaye alors de tendre vers une solution quasi-statique ($\nu=cste$)
- On introduit alors un facteur d'amortissement η (par défaut DRFCTR=0.995) sur les vitesses

$$v^{n+\frac{1}{2}} = \eta v^{n-\frac{1}{2}} + a^n \Delta t$$

- Le processus de relaxation continu jusqu'à un critère de convergence basé sur l'énergie cinétique global

$$E_{cine} < drtol \cdot E_{cine}^{\max}$$

- Par défaut cvtol=0.001

Relaxation dynamique

- Il est possible d'estimer le nombre de cycle nécessaire pour diminuer d'un facteur 10, l'amplitude des phénomènes dynamiques (Krieg) :

$$n_{cycle} = 1,15 \frac{\omega_{max}}{\omega_{min}}$$

- Dans le cas des coques (et des poutres), le rapport des fréquences max et min peut être très grand et implique une convergence très lente

Relaxation dynamique

- La mise en place de l'algorithme de relaxation dynamique se fait par utilisation du mot-clé

```
*CONTROL_DYNAMIC_RELAXATION
```

```
$ NRCYCK DRTOL DRFCTR
```

```
250 .001 .995
```

Viscosité numérique

Viscosité numérique
Chocs et discontinuités
Équations de Rankine-Hugoniot
Équations d'état (EOS)

Viscosité numérique

- Ondes de chocs : caractéristiques de la propagation d'ondes de forte amplitude dans les solides
- Elles peuvent apparaître spontanément dans le matériau
- Au niveau macroscopique, on les définit comme une discontinuité sur le champs des vitesses, température, entropie ...
- Les équations de discontinuité de Rankine-Hugoniot permettent de connaître de part et d'autre du front de choc les valeurs de ces champs (conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie)

Vitesse de propagation du front de choc

$$(\rho - \rho_0)v_s = \rho(v - v_0) \longrightarrow \text{Conservation de la masse}$$

$$p - p_0 = \rho_0 v_s (v - v_0) \longrightarrow \text{Conservation de la quantité de mouvement}$$

$$e - e_0 = \frac{p - p_0}{2} \cdot \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0 \rho} \longrightarrow \text{Conservation de l'énergie}$$

Viscosité numérique

- Ces trois équations de continuités peuvent être regroupées sous une seule (relation dite de Rankine-Hugoniot)

$$e - e_0 = -\frac{1}{2}(p_0 + p)(v - v_0)$$

Viscosité numérique

- En pratique, la vérification de la relation de Rankine-Hugoniot est trop coûteuse (même en 1D)
- Von Neumann et Richtmyer introduisent le concept de viscosité numérique (Bulk Viscosity)
- On ajoute dans les équations de conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie, un terme dissipatif permettant de lisser les chocs
- Ce terme dissipatif est relatif à une pression ayant les propriétés suivantes
 - ★ Les solutions des équations de la quantité de mouvement, de l'énergie et de continuité de la masse ne présentent pas de discontinuités
 - ★ Le choc soit étalé sur un nombre fixé d'éléments du maillage indépendamment de l'amplitude du choc et des conditions dans lesquelles se trouve le matériau
 - ★ Les équations de Hugoniot doivent rester valables à une échelle très supérieure devant l'épaisseur du choc
- L'introduction d'une viscosité numérique n'est pas défavorable à un bon bilan énergétique car cet état de pression interne plus forte (activation de la pression numérique par le choc) disparaît en même temps que le choc qui lui a donné naissance en le restituant sous la forme d'énergie cinétique

Viscosité numérique

- Dans DYNA, le terme suivant est alors utilisé

$$q = \rho l (Q_1 l (tr \underline{\dot{\epsilon}})^2 - Q_2 a (tr \underline{\dot{\epsilon}})) \quad \text{si } tr \underline{\dot{\epsilon}} < 0$$

$$q = 0 \quad \text{si } tr \underline{\dot{\epsilon}} \geq 0$$

$$l = \sqrt{A} \text{ en 2D}$$

$$l = \sqrt[3]{V} \text{ en 3D}$$

a est la vitesse du son dans le milieu

- Les coefficients Q_1 et Q_2 sont des coefficients matériaux

*CONTROL_BULK_VISCOSITY

\$	Q1	Q2	TYPE
	1.500	.060	1

Liaisons cinématiques/ Solides Rigides

Contraintes cinématiques
Comment représenter une liaison sans la
modéliser
Solides Rigides

Contraintes cinématiques

- Dans LS-Dyna, il est possible d'imposer des contraintes cinématiques sans pour cela les modéliser (mailler)
- Cette méthode est souvent utilisée pour représenter une liaison (parfaite ou non)
- L'introduction de liaisons cinématiques se fait par la traduction géométrique des équations de liaisons
- Il est ainsi possible de modéliser des liaisons de type : rotule, pivot, appui-plan, glissière, hélicoïdale, cardan, crémaillère, roue-pignon, courroie, liaison motorisée en rotation/translation
- Il est possible de limiter le débattement des liaisons et d'introduire du frottement (modèle équivalent à la plasticité)
- Dans beaucoup de codes de calcul, il est nécessaire de modéliser les liaisons (mailler) et de définir le contact entre les pièces en liaison
- Dans LS-Dyna, ce n'est pas obligatoire (et c'est ce qui en fait un point fort)
- Ceci ne s'applique qu'aux solides rigides
- La mise en donnée est effectuée à l'aide des mots-clé

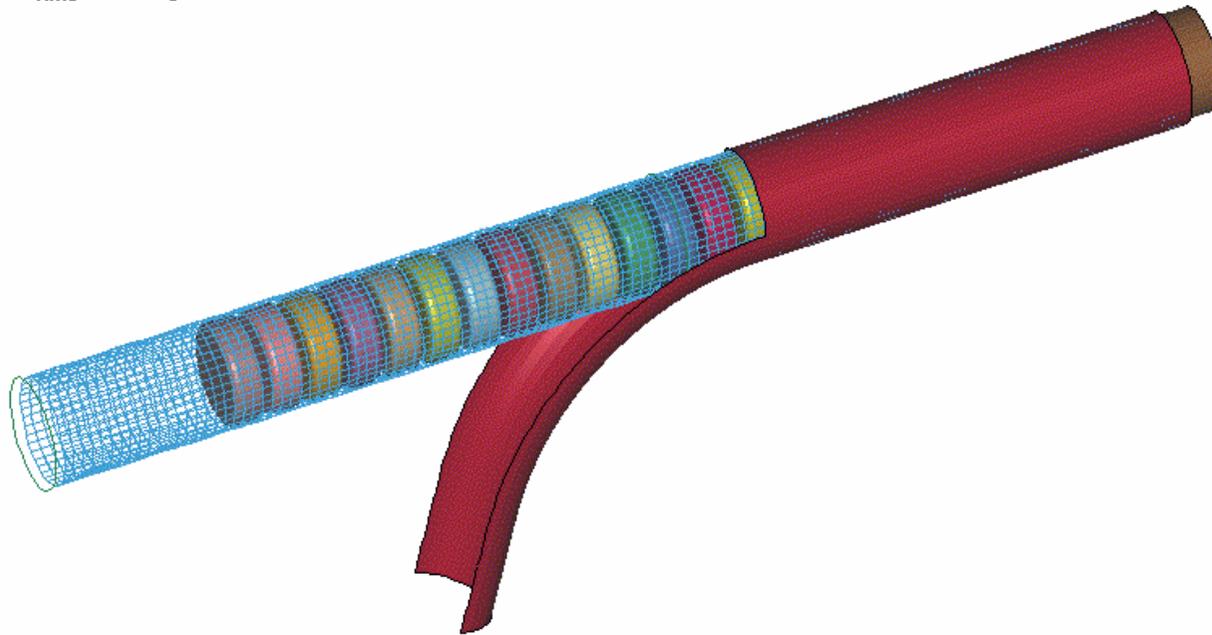
*CONSTRAINED_JOINT_

*CONSTRAINED_EXTRA_NODES

Contraintes cinématiques

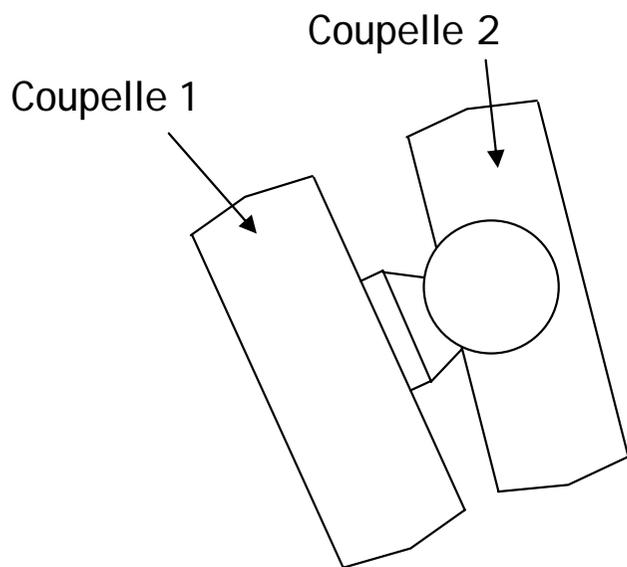
- Exemple en mise en forme : le cintrage de tube
- On utilise des coupelles (dans le tube) pour limiter le plissement du tube lors du cintrage

CINTRAGE D'UN TUBE
Time = 0



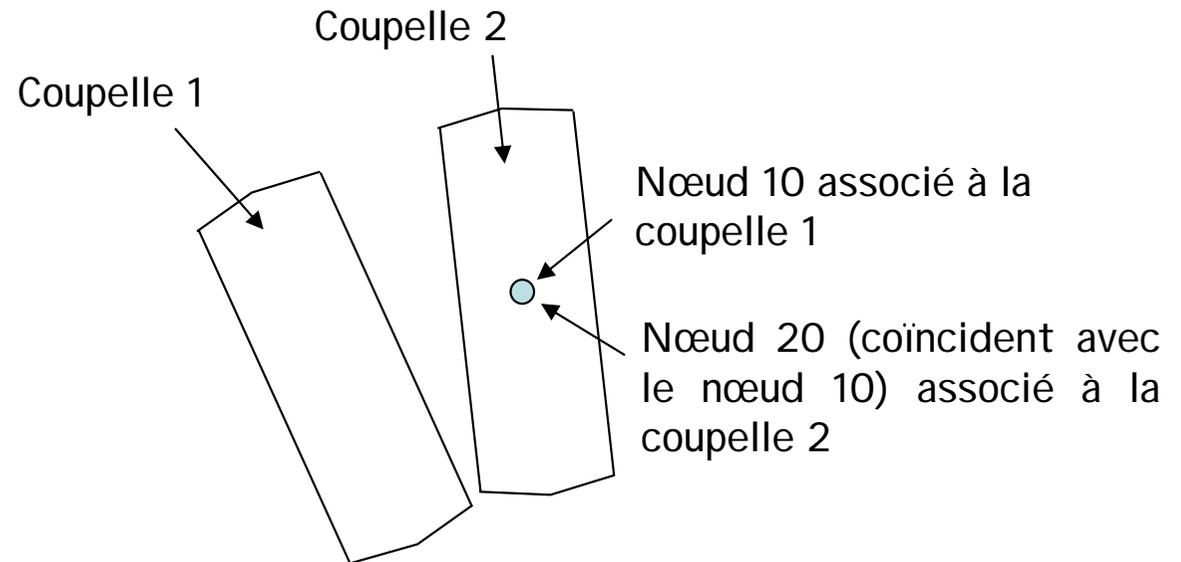
Contraintes cinématiques

- Les différentes coupelles sont rotulées les unes aux autres
- Dans les codes commerciaux de mise en forme (PamStamp 2G), le seul moyen de réaliser le rotulage est de mailler la liaison (barres rigides)
- Dans LS-Dyna, on va définir le centre de liaison (avec des nœuds) et définir une liaison rotule



On associe les nœuds aux solides rigides

```
*CONSTRAINED_EXTRA_NODES_NODE
$^EXTRA_NODES_CARD 1
$      PID      NID
      1         10
      2         20
```



On définit une liaison rotule aux nœuds 10 et 20

```
*CONSTRAINED_JOINT_SPHERICAL
$ NID1  NID2
   10    20
```

Application : liaison pivot

- Applications : Liaison pivot entre deux coques avec contrôle du débattement angulaire

Solides rigides

- L'utilisation de solides rigides se fait par l'intermédiaire de la loi de comportement *MAT_RIGID
- De par son caractère indéformable, il est possible de contraindre le centre de gravité d'un solide rigide en translation/rotation
- Il est ainsi possible d'imposer des mouvements (accélération, vitesse ou déplacement) à un solide rigide selon ses six degrés de liberté

```
*MAT_RIGID
$^MOBILE
$      MID      RO      E      PR      N      COUPLE      M      ALIAS
      37.8000E-09 210000.0      0.30      0.0      0.0      0.0
$      CMO      CON1      CON2
      1.0      7.0      5.0
$LCO_OR_A1      A2      A3      V1      V2      V3
      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
```

- E et n sont utilisés pour définir la raideur de contact
- CMO : Contraintes sur le centre de gravité
 - CMO = 0 : Pas de contraintes (Solide rigide libre de tout mouvement)
 - CMO = 1 : Centre de gravité contraint dans le repère global
 - CMO = -1 : Centre de gravité contraint dans un repère local
- CON1 : Degrés de liberté en translation contraints
- CON2 : Degrés de liberté en rotations contraints

Solides rigides

- Les mouvements imposés (en fonction du temps) se font par l'intermédiaire du mot clé

```
*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID
```

```
$^PRESCRIBED MOTION CARD 1
```

\$	PID	DOF	VAD	LCID	SF	VID	DEATH	BIRTH
	1	5	2	1	-1.0	01.0000E+28		0.0

- On définit ici un mouvement imposé dans le repère global (si local `_MOTION_RIGID_LOCAL`)
- PID : Numéro de la pièce
- DOF : Degré de liberté imposé
- VAD : Vitesse, accélération ou déplacement
- LCID : Numéro de la courbe d'évolution
- SF : Facteur d'échelle
- La courbe d'évolution est donnée par

```
*DEFINE_CURVE
```

```
$^ROTX
```

\$	LCID	SIDR	SFA	SFO	OFFA	OFFO	DATTYP
	1	0	1.0	1.0	0.0	0.0	0
\$		A1		O1			
		0.0		0.0			
		0.010		1.274			

Solides rigides

- Il peut apparaître certaines difficultés pour imposer un mouvement en rotation à un solide rigide
- En effet, il est souvent nécessaire de définir un mouvement de rotation autour d'un axe qui ne passe pas par le centre de gravité (par ex: une came)
- Il existe plusieurs techniques pour remédier à ce problème

Technique 1 : Définition géométrique du centre de masse et des inerties

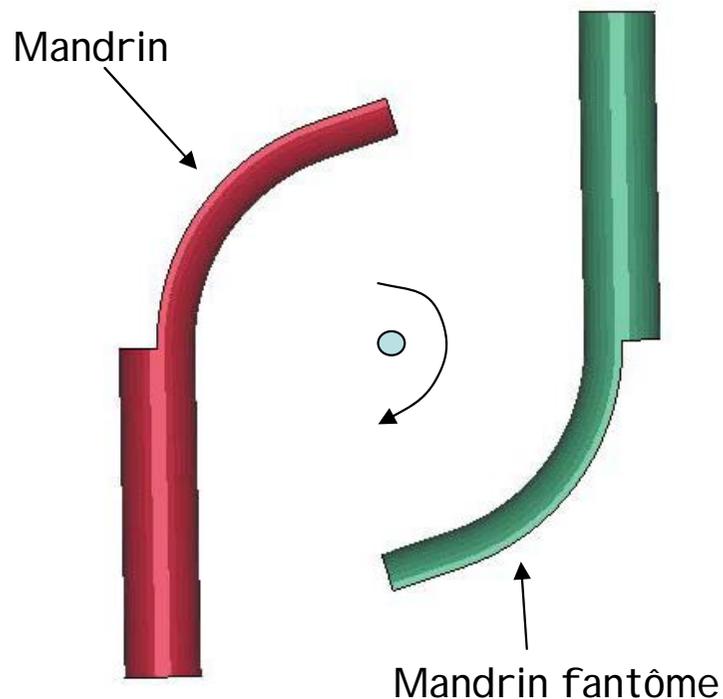
```

*PART
$HEADING
Die
$      PID      SECID      MID      EOSID      HGID      GRAV      ADPOPT      TMID
      1          1          3
$      XC          YC          ZC          TM      IRCS      NODEID
$      IXX          IXY          IXZ          IYY          IYZ          IZZ
$      VTX          VTY          VTZ          VRX          VRY          VRZ
    
```

- XC, YC et ZC : Position du centre de gravité
- TM : Masse en translation
- IRCS : Définition des inerties dans le repère local ou global
- NODEID : Nœud définissant le centre de gravité
- IXX, IXY, IXZ, IYY, IYZ et IZZ : Composantes de la matrice d'inertie
- VTX, VTY, VTZ, VRX, VRY et VRZ : Vitesses initiales en translation/rotation

Solides rigides

Technique 1 : Définition d'une pièce fantôme (exemple du cintrage de tube)



```

*PART
$HEADING
Mandrin
$      PID      SECID      MID
          1          1          1

*PART
$HEADING
Mandrin
$      PID      SECID      MID
          13         1          1

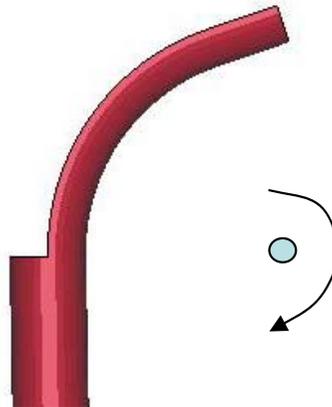
*CONSTRAINED_RIGID_BODIES
$^RIGID BODIES CARD 1
$      PIDM      PIDS
                1          13
    
```

- On définit ainsi un seul solide à partir de 2
- On ne définit pas de contact en relation avec le mandrin fantôme
- Celui-ci permet alors de définir l'axe de rotation réel
- Cela n'influence pas le temps de calcul (solide rigide)

Solides rigides

Technique 1 : Utilisation des contraintes cinématiques

- Définition d'une liaison pivot au centre de rotation du mandrin (*CONSTRAINED_JOINT_REVOLUTE)
- Motorisation de la liaison (*CONSTRAINED_JOINT_MOTOR_ROTATIONAL)



Restart et Multi-phases

Restart Simulations Multi-Phases

Restart

- Dans LS-Dyna, il est possible d'effectuer des opérations de restart
 - Restart manuel : Dans le cas où le calcul a été interrompu (par maladresse ou manuellement)
 - Small restart : On veut poursuivre un calcul (par ex: le temps initial est insuffisant)
 - Full restart : On veut récupérer des résultats d'un calcul et effectuer une nouvelle opération

- Par utilisation de la carte *DATABASE_D3DUMP, il est possible de définir une sauvegarde du calcul pour un restart

- Dans le cas du small restart, il n'est pas possible de faire une initialisation des contraintes

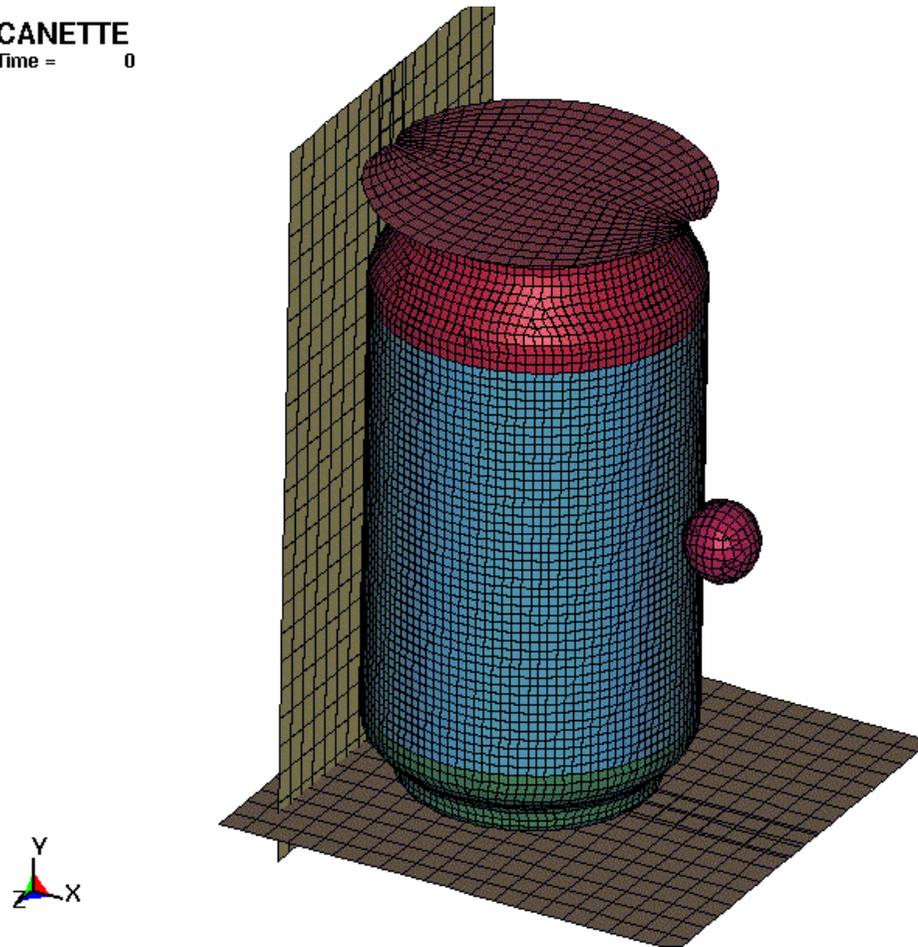
- Le full restart implique de mettre toutes les informations dans le calcul initial et d'apporter les modifications dans le fichier restart (à réserver aux experts)

```
ls970 i=restart.dyn r=d3dump
```

Restart

- Exemple de la canette à boisson

CANETTE
Time = 0



Simulations multi-phases

- Dans certains domaines, il est nécessaire de séparer les simulations en plusieurs étapes
 - Mise en forme (emboutissage) : Gravité, serrage, emboutissage, détournage, coarsening (déaffinage du maillage) et retour élastique
 - Crash automobile : Gravité puis impact
 - Influence des procédés de fabrication : mise en forme puis impact
- Il est possible de le faire par le biais d'un restart
- En pratique : c'est trop compliqué
- On va utiliser les simulations multi-phases
 - Après chaque simulation, on sauvegarde les pièces et les informations qui y sont attachées par l'utilisation du mot clé

```
*INTERFACE_SPRINGBACK_(OPTION)
```

```
$ PID    NHV
```

```
2        4
```

```
*SET_PART
```

```
2
```

```
2
```

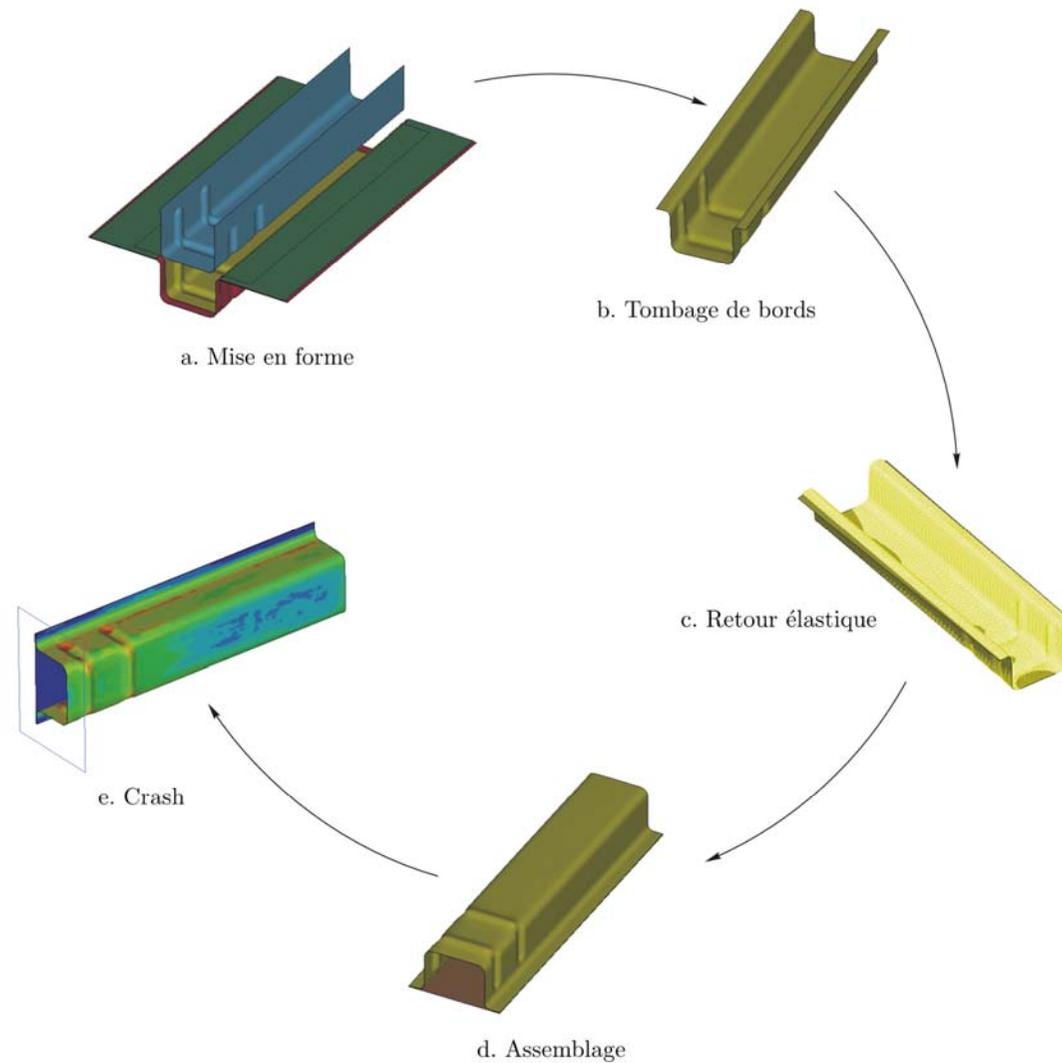
Simulations multi-phases

- Historiquement, cette carte a été mise en place pour les procédés d'emboutissage pour la simulation, après formage, du retour élastique (springback)
- Dans la version 970, on ne peut sauvegarder que les éléments de coques
- Dans la version 971, on sauvegarde ce que l'on veut
- Ce mot clé créé en fin de simulation un fichier dynain dans le répertoire courant
- Ce fichier texte (ASCII) comporte toutes les géométries des pièces sauvegardées (*SET_PART) et les informations associées (contraintes, déformations, adaptativité, variables historiques)
- On peut alors utiliser ce fichier, dans un nouveau calcul par l'intermédiaire du mot clé

```
*INCLUDE  
/chemin/dynain
```

- Ce mot clé permet d'inclure à la suite des fichiers ASCII
- Il est très utilisé pour alléger le fichier de données (ex: mise en données + fichier maillage + fichier matériau)
- C'est assez puissant pour tester diverses géométries avec les mêmes sollicitations
- Optimisation de formes (géométries)
- Par expérience : séparer mise en données et maillage (souvent volumineux)

Exemple



Quelques mots sur l'implicite

Quelques informations sur la
résolution de problèmes par la
méthode Quasi-statique
Implicite

Méthode implicite

- La mise en œuvre de calcul par la méthode de résolution implicite est souvent beaucoup plus complexe que la méthode explicite
- On ne peut pas faire une présentation de cette méthode en quelques lignes
- Néanmoins, nous allons présenter quelques commandes utiles
- **La force de LS-DYNA : un seul exécutable pour tout**
 - Dans la plupart des codes de calculs par EF, les approches explicites et implicites sont séparées (voir inexistantes)
 - Ex Abaqus : Abaqus Standard (Implicite) et Abaqus Explicit sont vendus séparément
 - Ex Ansys : implicite linéaire/non linéaire et LS-DYNA pour l'explicite
 - Ex Nastran : implicite linéaire (non linéaire ?)
 - Un autre avantage est de pouvoir coupler les deux méthodes (Switching I/E)

Méthode implicite

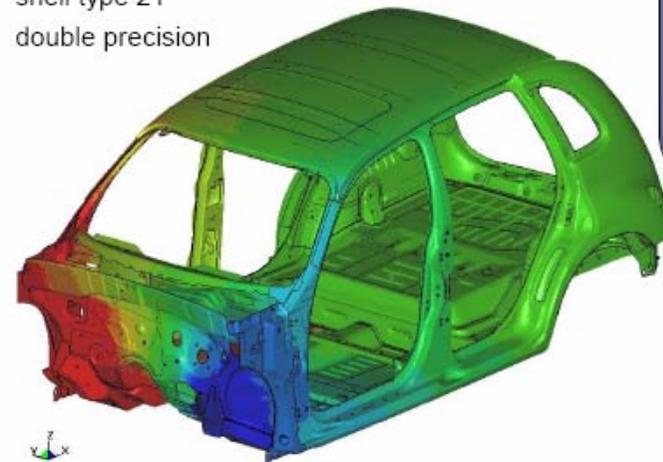
2000 Chrysler PT Cruiser
Body Assembly



Courtesy of Daimler-Chrysler
Auburn Hills, Michigan, USA

Static Linear Torsion Analysis:

- MTHSOL=1
- shell type 21
- double precision



model details

240,000 nodes
3,300 type 100 spotwelds
1,450,000 equations
memory=740m (~6 Gbyte)

SMP parallel performance

1 cpu: 753 sec
4 cpu: 485 sec

Warning: larger models demand 64-bit O/S to exceed 2 Gbyte memory limit

Méthode implicite : quelques conseils

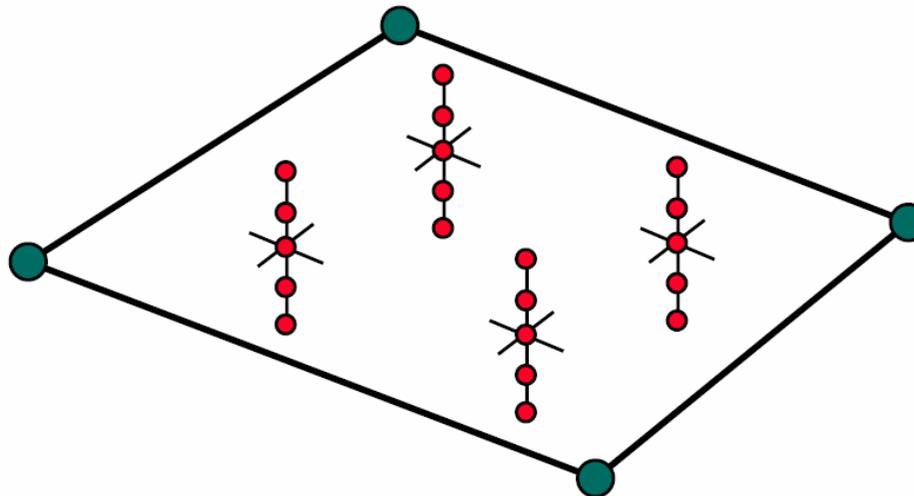
- On a déjà énoncé le fait que la mise en œuvre d'un calcul implicite est souvent plus délicat que son équivalent explicite
- Un problème mis en œuvre avec la méthode implicite fonctionnera sans aucuns problèmes avec la méthode explicite (et même de manière plus simple)
- Par contre, il faut faire attention aux hypothèses posées : la méthode de dynamique transitoire explicite est associée à des phénomènes transitoires (rapides) alors que par définition la méthode quasi-statique implicite est associée à des phénomènes quasi-statique
- En mise en forme, on a souvent fait appel à la méthode explicite pour les problèmes de contact -> le temps est alors recalé (non physique)
- Dans LS-DYNA, il est très facile de passer d'une méthode à l'autre
- Néanmoins, une simulation en explicite peut ne pas être résolue par la méthode implicite (ex :localisations associées aux contacts)
- Le contraire est aussi une réalité pour des phénomènes longs. Les simulations fonctionnent mais donnent lieu à des temps de calculs énormes (ex: mise en action d'un rotor ~quelques semaines...)
- Dans ce cas on s'oriente vers l'utilisation d'un schéma de type Newmark (~quelques min)

Méthode implicite : quelques conseils

- Lorsque l'on utilise un code de calcul utilisant la méthode implicite, il faut prendre certaines précautions :
 - Utilisation d'éléments adaptés au calcul implicite (souvent des éléments totalement intégrés)
 - Utiliser un exécutable en **double precision** (sinon risque de divergences associées à la précision des calculs)
 - Lorsque l'on fait une analyse non linéaire on doit utiliser une formulation objective des contraintes, donc il faut utiliser sans conditions des éléments possédant cette option ainsi que la carte ***CONTROL_ACCURACY**
 - Pour le reste, cela reste une question ouverte selon les simulations et les difficultés

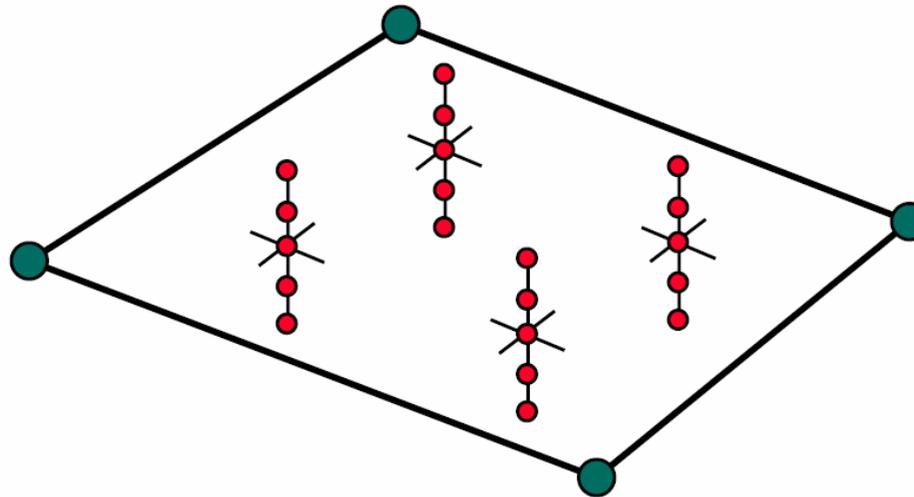
Méthode implicite : Éléments utilisés

- Dans le cas d'une analyse par utilisation d'un algorithme implicite, on n'utilise plus les mêmes éléments que dans le cas explicite
- Pour les coques, on préconise l'utilisation d'éléments totalement intégrés
- Élément de coque de référence en implicite : Hugues-Liu(S/R) ELFORM -> 6
 - Élément de référence pour analyse non-linéaire
 - C'est le plus coûteux en terme de temps de calcul
 - Objectivité prise en compte (JAUMANN)-> *CONTROL_ACCURACY
 - Dégénérer en triangle



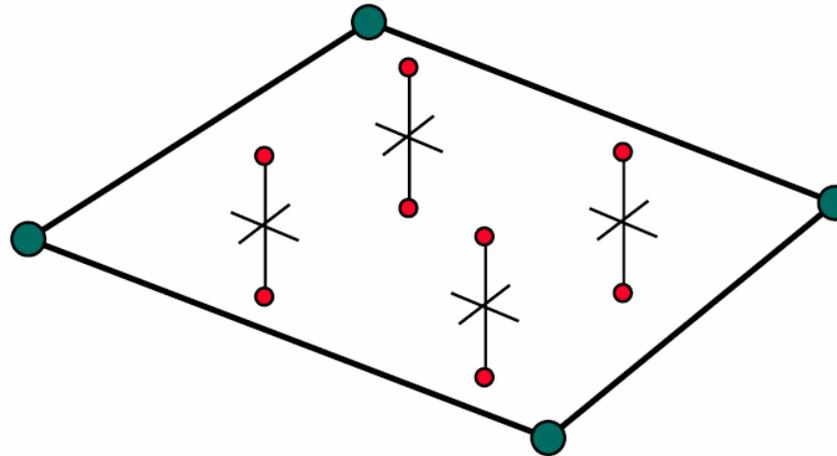
Méthode implicite : Éléments utilisés

- Autre élément : FAST FULLY INTEGRATED -> ELFORM=16
 - Élément de référence pour l'analyse du retour élastique
 - Objectivité prise en compte (JAUMANN)
 - Ne peut être dégénérer en triangle
 - Très bon rapport performances/résultats



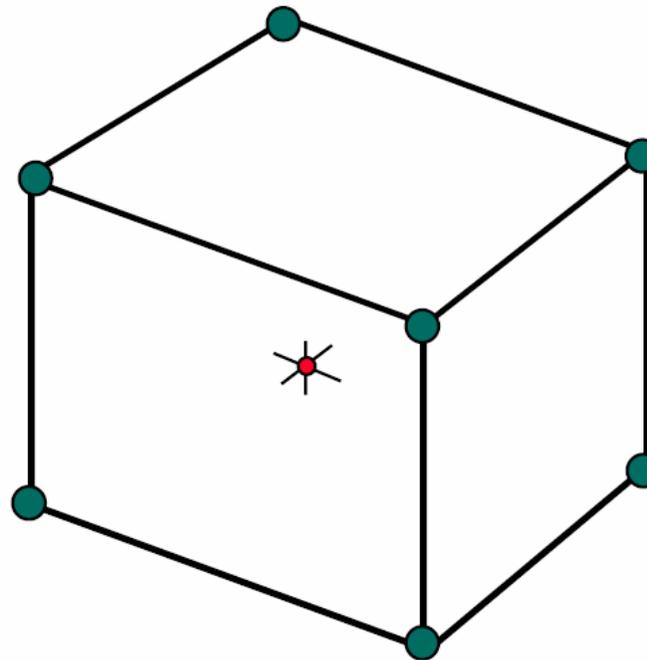
Méthode implicite : Éléments utilisés

- Éléments de coques pour l'analyse linéaire et analyse modale
 - Trois éléments pour l'analyse linéaire : ELFORM=18,20 et 21
 - Elt 18 possède une formulation pour les quadrangles et une pour les triangles
 - Elt 18 : Théorie des Coques minces (Hypothèses de Mindlin)
 - Elt 20 : Théorie des Coques épaisses (Hypothèses de Reissner)
 - Elt 21 : Equivalent à l'élément CQUAD4 (Nastran)



Méthode implicite : Éléments utilisés

- Éléments 3D
 - Constant Stress solid ELFORM=1 (3 DOF = DX,DY,DZ)
 - C'est un élément à 1 point d'intégration mais ces performances sont excellentes
 - Il supporte de très grandes déformations (non-linéaires)
 - De manière surprenante, il donne aussi d'excellents résultats en linéaire
 - C'est le moins coûteux en terme de temps de calcul



Méthode implicite : Éléments utilisés

- Éléments 3D
 - Fully integrated (S/R) solid element : ELFORM=2
 - Le plus coûteux en temps de calcul
 - Trop raide pour une analyse linéaire
- Éléments 3D pour les analyses linéaires et analyses modales
 - Élément solide linéaire : ELFORM =18

Méthode implicite : Cartes associées

- Il existe 8 mots clés pour les analyses en implicite (en plus des mots clés standards)
 - *CONTROL_IMPLICIT_GENERAL
 - *CONTROL_IMPLICIT_SOLVER
 - *CONTROL_SOLVER_SOLUTION
 - *CONTROL_IMPLICIT_AUTO
 - *CONTROL_IMPLICIT_STABILIZATION
 - *CONTROL_IMPLICIT_DYNAMICS
 - *CONTROL_IMPLICIT_EIGENVALUE
 - *CONTROL_IMPLICIT_MODES
 - *CONTROL_IMPLICIT_BUCKLE
- Les trois premiers sont obligatoires pour une analyse linéaire ou non linéaire

Méthode implicite : Cartes associées

Détail des mots clés

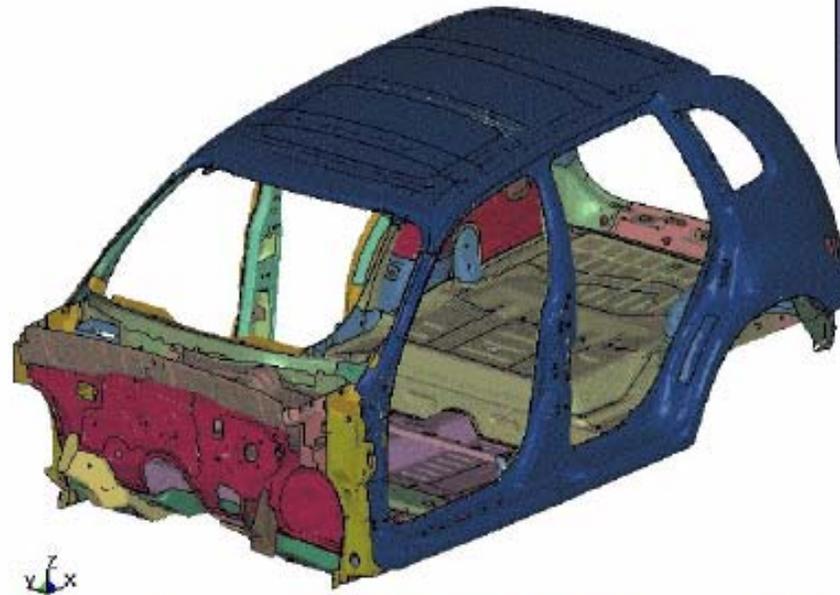
- *CONTROL_IMPLICIT_GENERAL : Activation du schéma de résolution implicite
- *CONTROL_IMPLICIT_SOLVER : Méthode de résolution du système linéaire
- *CONTROL_IMPLICIT_SOLUTION : Mise en œuvre d'une analyse linéaire ou non-linéaire et méthodes numériques associées (solveurs)
- *CONTROL_IMPLICIT_AUTO : Mise en œuvre du calcul automatique du pas de temps
- *CONTROL_IMPLICIT_STABILIZATION : Algorithme de stabilisation pour l'étude du retour élastique uniquement
- *CONTROL_IMPLICIT_DYNAMICS : Activation du schéma de Newmark
- *CONTROL_IMPLICIT_EIGENVALUE : Extraction modale (analyse modale)
- *CONTROL_IMPLICIT_MODES : Prise en compte des modes propres d'une structure dans un calcul
- *CONTROL_IMPLICIT_BUCKLE : Calcul des modes de flambement

Méthode implicite : Exemple en analyse modale

Calcul des 30 premiers modes propres d'une caisse en blanc (PT-Cruiser)

Compute Lowest 30 Modes

- shell type 16
- double precision



model details
240,000 nodes
3,300 type 100 spotwelds
1,450,000 equations
memory=1400m (~12 Gbyte)

performance
1 cpu: 25 minutes

Warning: larger models demand 64-bit O/S to exceed 2 Gbyte memory limit

Le calcul des modes propres avant une analyse statique permet aussi de déterminer si des modes de corps rigides sont présents et permet dans ce cas de les supprimer

Méthode implicite : Compatibilité avec Nastran

- LS-DYNA peut lancer des fichiers Nastran sans modification du fichier
- Il est compatible pour des analyses linéaires (type 101)
- Il est compatible pour des analyses modales (type 103)
- Deux méthodes sont alors possibles pour lancer les calculs
 - La première consiste à lancer directement LS-DYNA avec comme entrée le fichier nastran

```
ls970 i=input.nas
```

- La seconde consiste à l'introduire dans un fichier de données LS-DYNA

```
*INCLUDE_NASTRAN  
  
$ beam_df shell_df solid_df  
      2      21      21  
  
$ filename  
input.nas
```

Maillages

Sur les maillages Conseils et mise en œuvre Techniques d'assemblages

Maillage réglé vs maillage libre

➤ Dans le cas de calcul de structures linéaires

- Le maillage n'a pas une grande importance en terme d'orientation des mailles
- Le maillage doit représenter la géométrie au "mieux"

➤ Dans le cas de calcul en dynamique rapide

- Le maillage a une très grande importance
- Dans le cas du crash, on propage une onde dans la structure
- Un maillage non réglé mène à des localisations non physiques
- En dynamique rapide, il existe une orientation principale : la direction de propagation de l'onde
- On doit donc, en principe, mailler la structure le plus régulièrement possible
- On limite l'utilisation des éléments triangulaires car du fait d'une interpolation linéaire, ceux-ci sont plus raides que les éléments quadrangulaires (pas plus de 5% voir pas du tout si possible)
- Un critère subjectif : le maillage doit être "beau"

Maillage réglé vs maillage libre

➤ Dans le cas de calcul en dynamique rapide

- On doit bannir les symétries (surtout si le matériau est anisotrope)
- Malgré une direction privilégiée de sollicitations, on privilégie les modes de bifurcations de la structure
- Or ces modes ne sont pas nécessairement symétriques
- On va donc forcer la structure à se déformer selon une configuration qui n'est pas nécessairement celle que l'on obtient expérimentalement
- On doit donc **bannir les symétries**
- Dans Dyna, il est possible de calculer les modes de bifurcations de la structure (en implicite)
- La taille de maille est fonction de la représentation de la déformée (ondulation)
- En crash automobile, la taille de maille est approximativement de 5 mm (1mm chez BMW et AUDI)

Adage numérique : un bon maillage est le départ d'un bon calcul ...

Maillage réglé vs maillage libre

➤ Dans le cas de la mise en forme

- Le trajet du maillage est imposé par les outils
- Le comportement matériel est souvent anisotrope (orthotropie des tôles)
- Le maillage peut être libre
- Néanmoins, un maillage réglé du flan et des outils est un avantage
- La taille des mailles des outils rigides doit être du même ordre de grandeur que la taille de maille du flan
- En mise en forme de structure mince, on utilise un maillage de type adaptatif pour le flan
- En mise en forme de structure volumique, on utilise un remaillage du lopin

➤ Dans le cas général

- Préférer un maillage régulier et donc réglé
- Limiter l'utilisation des symétries (ce qui va à l'encontre des préconisations en statique)
- Mailler pièces rigides et déformables selon une taille de maille équivalente
- Maillage avec des quadrangles (limiter les triangles) avec un ratio proche de 1 (carrés)

Maillage réglé vs maillage libre

➤ Maillage libre

- Facile à mettre en œuvre
- Maillage adapté au calcul statique
- Peu (voir aucune) maîtrise du maillage
- N'est pas adapté pour le cas de la dynamique rapide

➤ Maillage réglé

- Difficile à mettre en œuvre
- Maîtrise du maillage (ratio, taille de maille)
- Orientation privilégiée prise en compte

➤ Suggestions de maillages

- **ANSA** (Automatic Net-Generation for Structural Analysis de Beta CAE Systems) : le plus performant du marché (le + cher aussi) et très utilisé dans l'industrie automobile et aéronautique (compatible Patran, Nastran, Abaqus, Dyna, Radioss, Pamcrash)
- HyperMesh(Altair Engineering) : un des meilleurs produits (très utilisé dans l'industrie sous l'appellation HyperWorks)

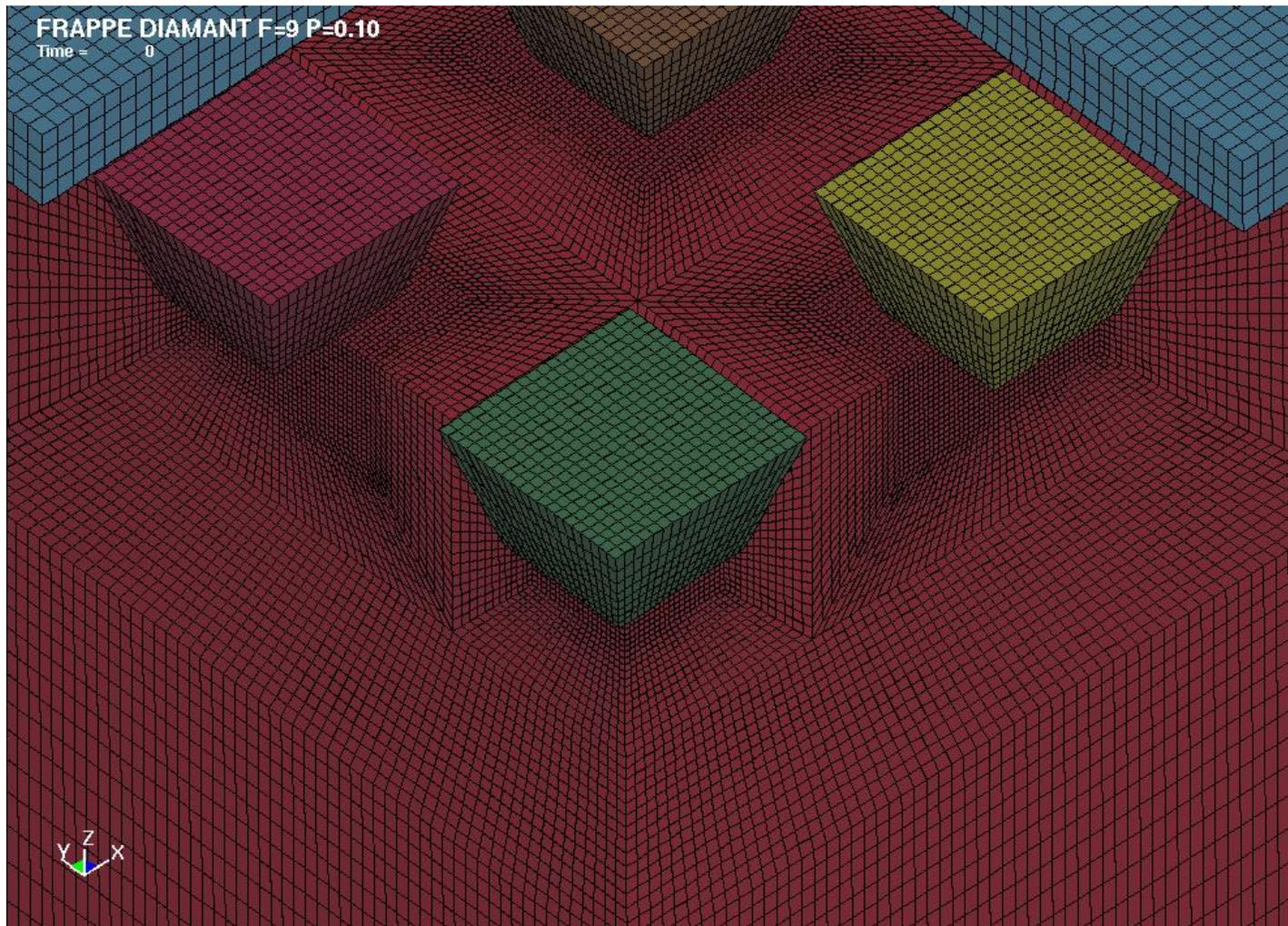
Maillage réglé vs maillage libre

➤ Suggestions de maillieurs

- FEMAP : Très bon maillieur possédant l'avantage d'importer ou d'exporter dans de nombreux formats
- PATRAN : Manque de compétitivité dans le cas de la dynamique rapide (pas de critère de maillage crash et pas de macro pour les assemblages)
- Le maillieur d'Ideas (disponible au labo) : difficile d'utilisation et impossibilité de faire des assemblages, mais il est possible d'exporter le maillage au format Dyna
- Le maillieur d'Ansys (disponible au labo) : c'est un moyen mais difficile pour les structures complexes

Exemple de maillage

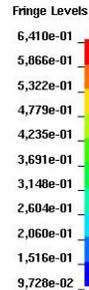
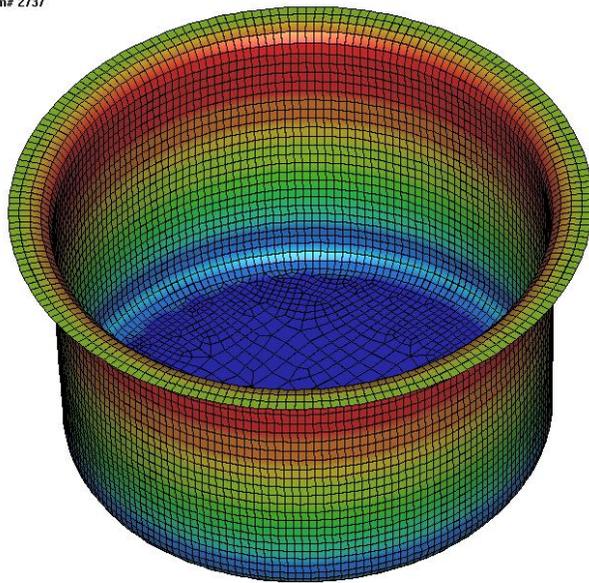
Frappe diamant Augé Découpage (1/4 de modèle - H. Lenoir)



Exemple de maillage

Emboutissage d'un godet

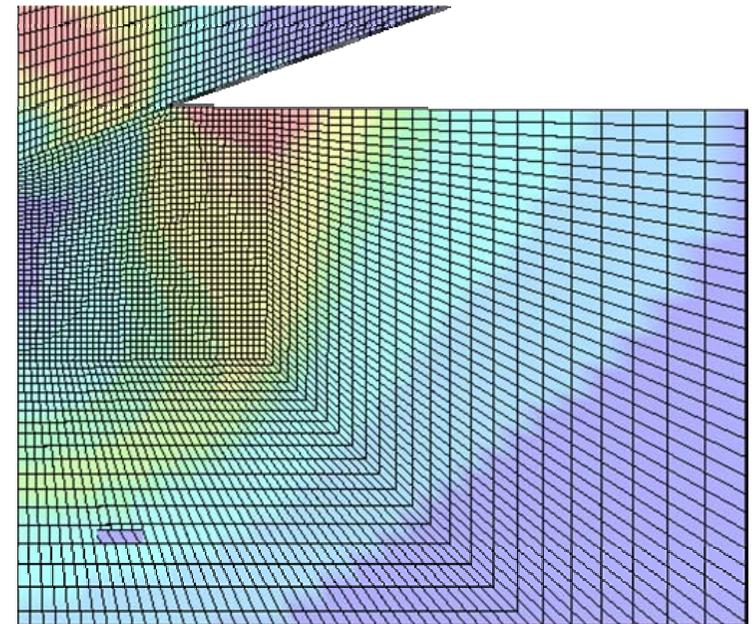
BENCHMARK DAIMLER CUP DRAWING
Contours of Effective Plastic Strain
max ipL. value
min=0,0972782, at elem# 25443
max=0,640981, at elem# 2737



LS-DYNA user input
Time = 3.857e-007

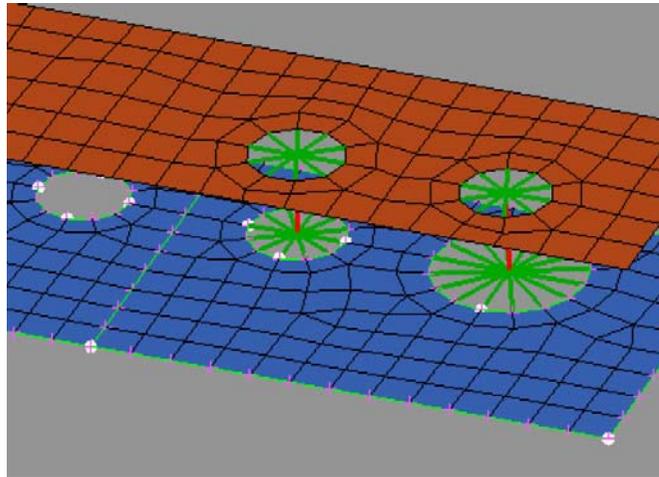


Essai de nano-indentation (F. Richard)

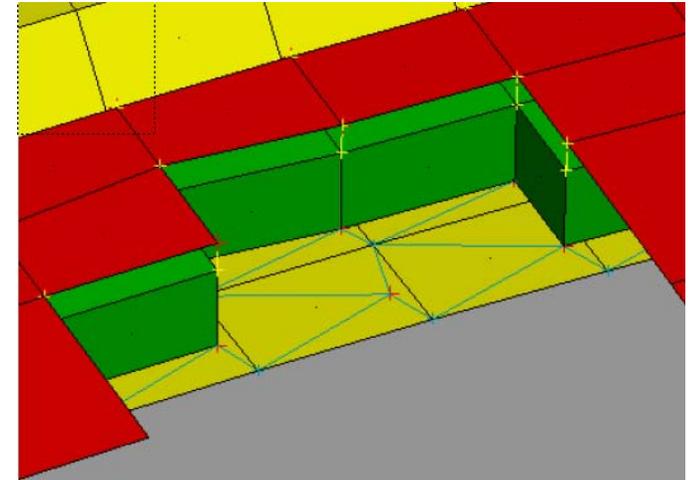


Techniques d'assemblages

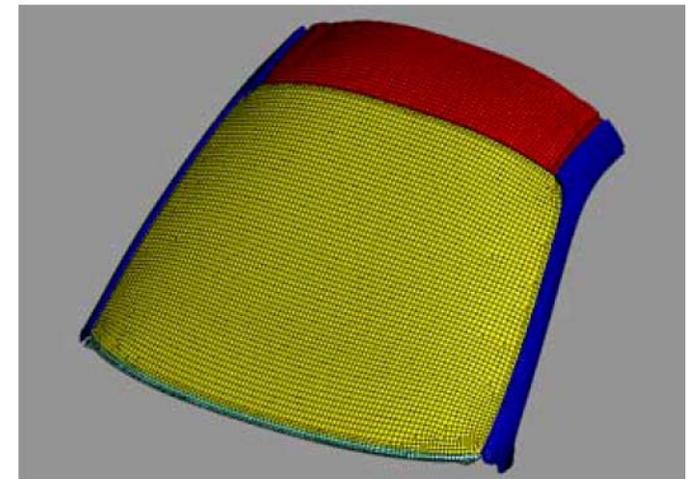
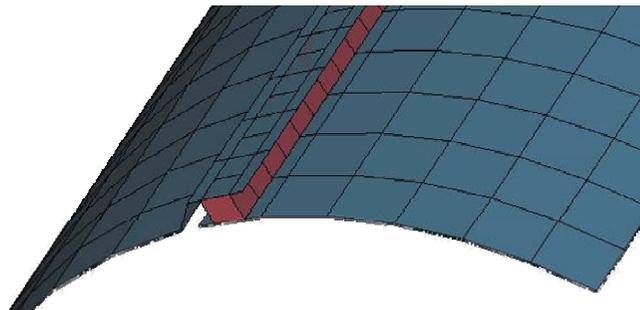
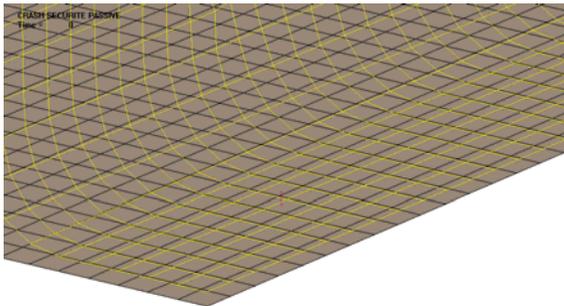
Boulonnage



Collage : Joint de colle sur pare-brise

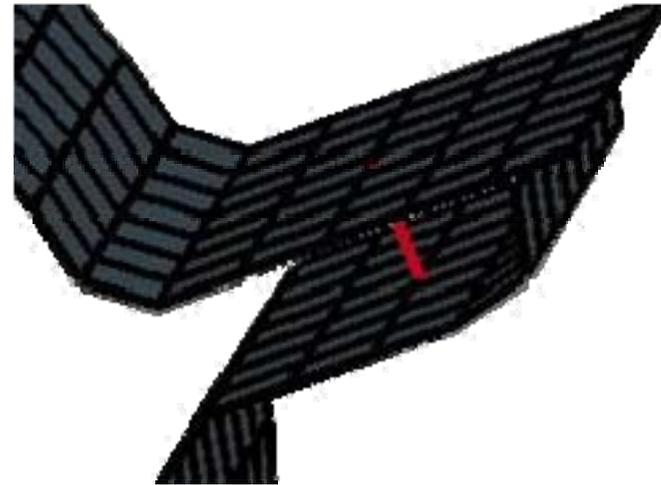


Points de Soudures (Éléments Spotweld)/
Cordons de soudures (Éléments volumiques)

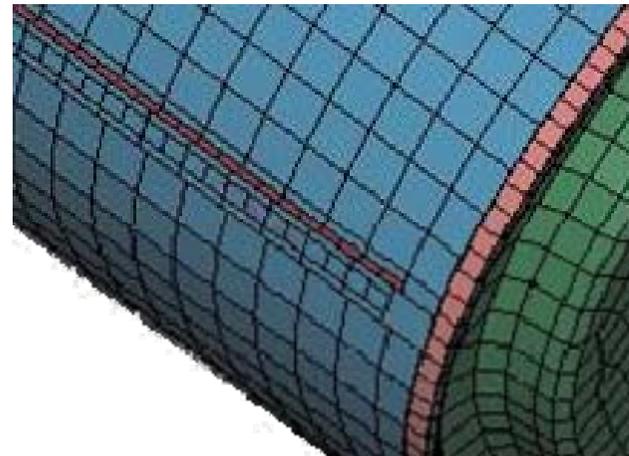


Techniques d'assemblages

Vissage permanent (élément de poutre de section égale au filetage)

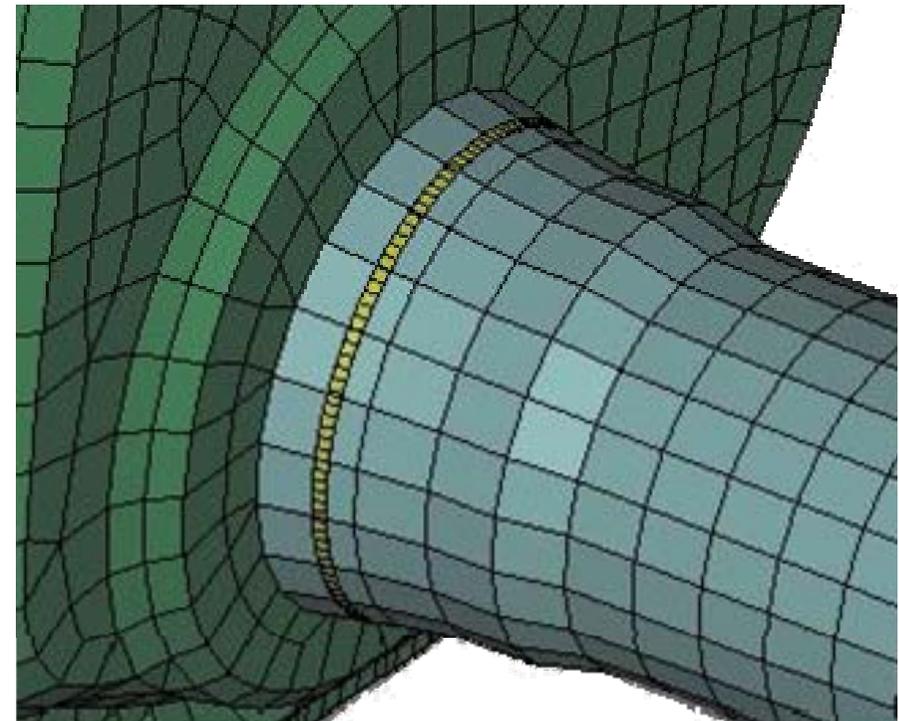


Agrafage (éléments volumiques spotweld non connectés)



Techniques d'assemblages

Sertissage (éléments spotweld volumiques non connectés)



Lois de comportement

Lois de comportement Usermat

Choix des matériaux (1)

- Quelles lois de comportement pour le matériau considéré ?
 - Matériaux métalliques
 - MAT_ELASTIC(_FINITE_STRAIN)
 - MAT_(GENERAL)_VISCOELASTIC
 - MAT_KINEMATIC
 - MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY
 - MAT_POWERLAW_PLASTICITY
 - MAT_TRANSVERSELY_ANISOTROPIC et MAT_BARLAT (Mise en forme des tôles)
 - MAT_RATE_SENSITIVE_POWERLAW_PLASTICITY
 - MAT_DAMAGE(1 ou 2) et MAT_GURSON
 -

Choix des matériaux (2)

- Quelles lois de comportement pour le matériau considéré ?
 - Polymères : élastique, viscoélastique ...
 - Polymères caoutchouteux : hyperélasticité
 - MAT_MOONEY_RIVLIN_RUBBER
 - MAT_HYPERELASTIC_RUBBER
 - MAT_OGDEN_RUBBER
 - MAT_CELLULAR_RUBBER
 - ...
 - Mousses à basses et hautes densités : comportement cellulaire
 - MAT_BLATZ-KO_FOAM
 - MAT_CLOSED_CELL_FOAM
 - MAT_LOW_DENSITY_FOAM
 - MAT_CRUSHABLE_FOAM
 - ...

Choix des matériaux (3)

➤ Quelles lois de comportement pour le matériau considéré ?

- Matériaux composites
 - MAT_COMPOSITE_(OPTION)
 - MAT_LAMINATE_(OPTION)
 - ...
- Plexiglas / Verre
 - MAT_LAMINATE_GLASS
- Bois
 - MAT_WOOD
- Béton / Céramique / Sol
 - MAT_SOIL_AND_FOAM
 - MAT_GEOLOGICAL_CAP_MODEL
 - MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_(OPTION)
 - ...

Choix des matériaux (4)

- Quelles lois de comportement pour le matériau considéré ?
 - Matériaux rigides
 - MAT_RIGID
 - Éléments discrets
 - MAT_SPRING_()
 - MAT_DAMPER_()
 - Tissus
 - MAT_FABRIC
 - MAT_SEATBELT
 - Matériaux biologiques
 - MAT_HEART_TISSUE
 - MAT_LUNG_TISSUE
 - MAT_SPRING_MUSCLE

Choix des matériaux (5)

- Quelles lois de comportement pour le matériau considéré ?
 - Equations d'état (fluides, gaz...)
 - MAT_NULL
 - EOS_GRUNEISEN
 - EOS_POLYNOMIAL
 - ...
 - Fluides Newtoniens, non Newtoniens
 - MAT_CFD (Ecoulement turbulent ou laminaire)
 - MAT_ELASTIC (Tout solide est un fluide qui s'ignore ...)
 - Prise en compte d'un couplage thermomécanique
 - MAT_(OPTION)_THERMAL
 - MAT_THERMAL_(OPTION)
 - ...
 - Si aucun des 400 matériaux n'est valable : usermat (programmation en fortran)

Liens utiles

www.lstc.com : société qui développe LS-DYNA (mise à jour des manuels)

www.ansys.com : site internet d'Ansys (quelques tutoriaux)

www.dynalook.com : base bibliographique de LSTC sur LS-DYNA (articles dédiés à LS-DYNA)

www.dynaexamples.com : site d'exemples de mise en données (Thermique, Mécanique, ALE, Implicite...)

www.lsdyna-portal.com : Site de la société CADFEM (revendeur Allemand de LS-DYNA), il y a des exemples et surtout un forum pour les questions/réponses

sebastien.thibaud@univ-fcomte.fr : Si je peux répondre ...

Perspectives

Pour le reste, rien de meilleur que la mise en pratique ...