FORMA12 – Travaux pratiques de la formation « introduction à l'analyse dynamique linéaire & non-linéaire »

Résumé :

Ce cas est est une introduction à l'usage de Code_Aster pour l'analyse transitoire dynamique (linéaire et non-linéaire). Il traite d'une plaque épaisse d'acier, sujette à une excitation sinusoïdale sur une table vibrante.
La plaque est modélisée en éléments 3D. On compare l'analyse transitoire sur base modale avec une analyse transitoire directe. Dans la dernière partie on prend en compte la plasticité de l'acier par une une loi non-linéaire.

Les différentes modélisations abordées sont :

- modélisation A : analyse modale ;
- modélisation B : transitoire direct ;
- modélisation C : transitoire sur base modale avec correction statique a priori ;
- modélisation D : transitoire sur base modale avec correction statique a posteriori ;
- modélisation E : transitoire non-linéaire ;
- Modélisation F : transitoire linéaire avec non-linéarité de contact.

Le premier chapitre présente la géométrie et les données communes à toutes les modélisations.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

1 Introduction

1.1 Géométrie

L'étude concerne une plaque épaisse d'acier. Sa géométrie est simple. Il s'agit d'un simple cube aplati :
longueur $2,0$ mètres , largeur $2,0$ mètres et épaisseur $0,003$ mètre [Figure 1.1-1].

La plaque est fermement encastrée sur l'un de ses côtés (ENCAS) et fixée sur une table vibrante.

On souhaite calculer le déplacement d'un point situé sur la face supérieure dans un coin de plaque, à l'opposé de l'encastrement (point P) [Figure 1.1-2].

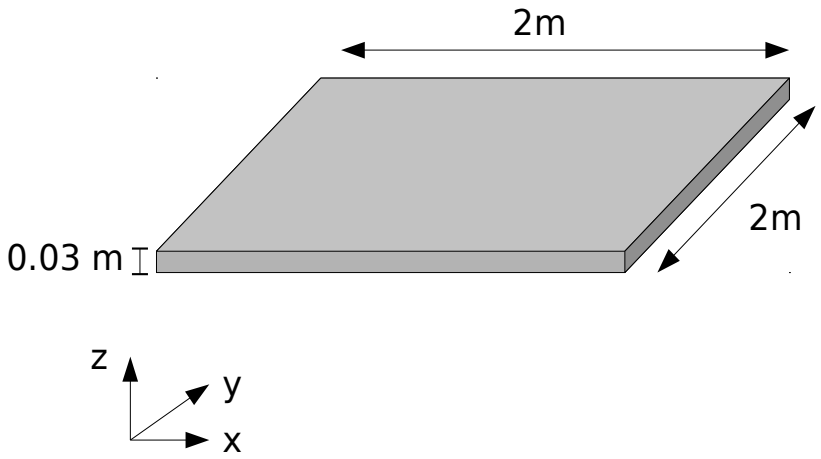


Figure 1.1-1

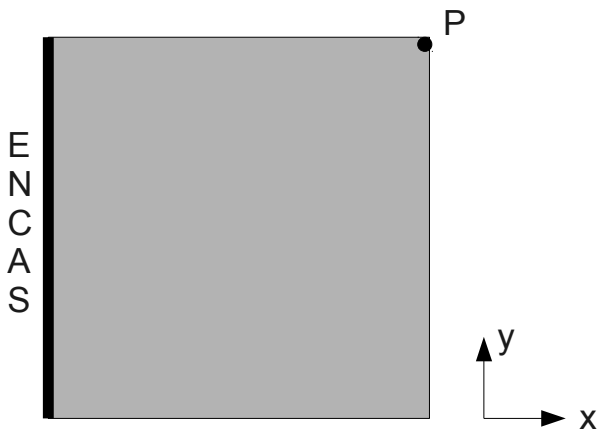


Figure 1.1-2

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

1.2 Matériaux

L'acier est, pour les analyses linéaires, considéré comme un matériau isotrope, élastique linéaire :S

- module d'Young : $E=200\,000.10^{+6}\,Pa$,
- coefficient de Poisson : $\nu=0,3$,
- masse volumique : $\rho=8\,000\,kg/m^3$

1.3 Conditions aux limites et chargement

La plaque est encastrée sur un de ses côtés.

Un ingénieur distrait (ou quelque peu facétieux) a fait une erreur dans les paramètres de la table vibrante. Au lieu de la sollicitation prévue (un accélérogramme synthétique), il a envoyé un simple signal sinusoïdal mais de très forte amplitude. La plaque n'a pas été conçue pour une telle secousse et on cherche à déterminer le mouvement que la plaque a pu subir lors de cet essai malencontreux.

Le signal d'entrée est un simple sinus de fréquence $15\,Hz$.
L'amplitude est $30\mathrm{g}$ horizontalement et $30\mathrm{g}$ verticalement vers le bas ($g=10\,m/s^2$).

La durée du signal est $0.5\,s$.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

2 Modélisation A – Analyse modale

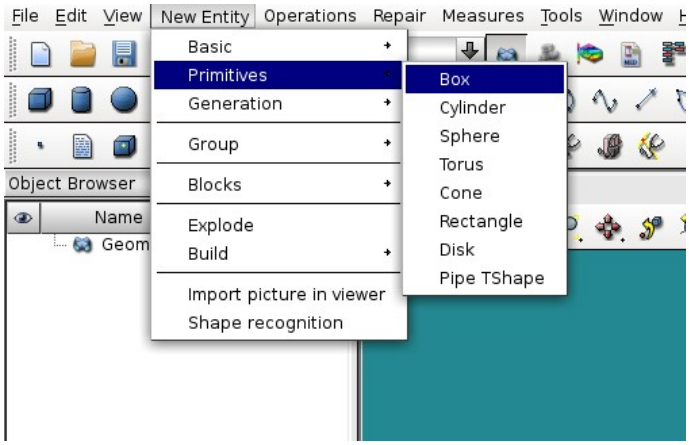
2.1 Objectifs

Pour avoir une idée des propriétés dynamiques du système, on commence par une analyse modale.
La géométrie est dessinée puis maillée sous Salome_Meca. Les premiers modes de la plaque sont ensuite calculés avec *Code_Aster*.

2.1.1 Géometrie dans SALOME

On modélise le système dans Salome.

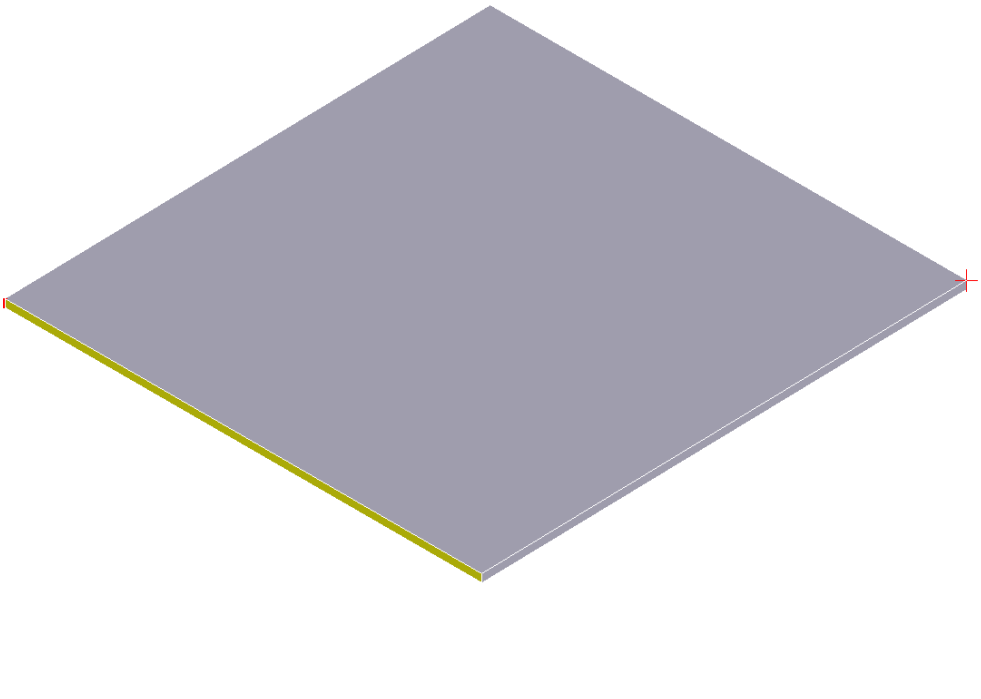
Dans le module `Geometry`, on utilise le menu `New Entity > Primitive > Box` pour construire une boîte avec les dimension du problème.



Pour spécifier dans *Code_Aster* les conditions aux limites et identifier les nœuds utiles aux post-traitements, on a besoin de nommer quelques éléments de la géométrie et quelques nœuds.
C'est fait grâce à `New Entity > Group > Create.`

La plaque est fixée sur un des côtés. On se sert d'un point de la face supérieure, dans un angle opposé au bord encastré, comme nœud de post-traitement.
Pour pouvoir préciser la finesse du maillage dans l'épaisseur de la plaque, il peut être utile de créer un groupe correspondant à l'arrête verticale d'un des coins de la plaque.

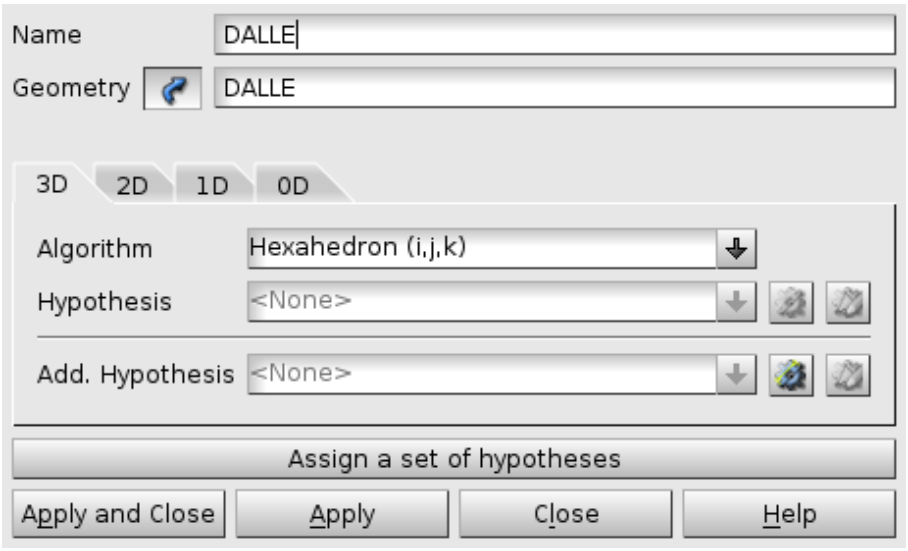
Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

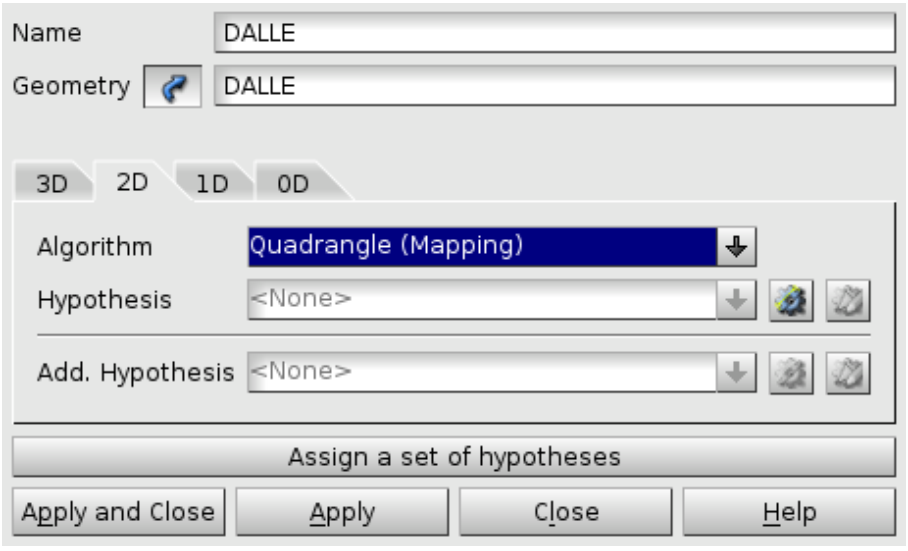


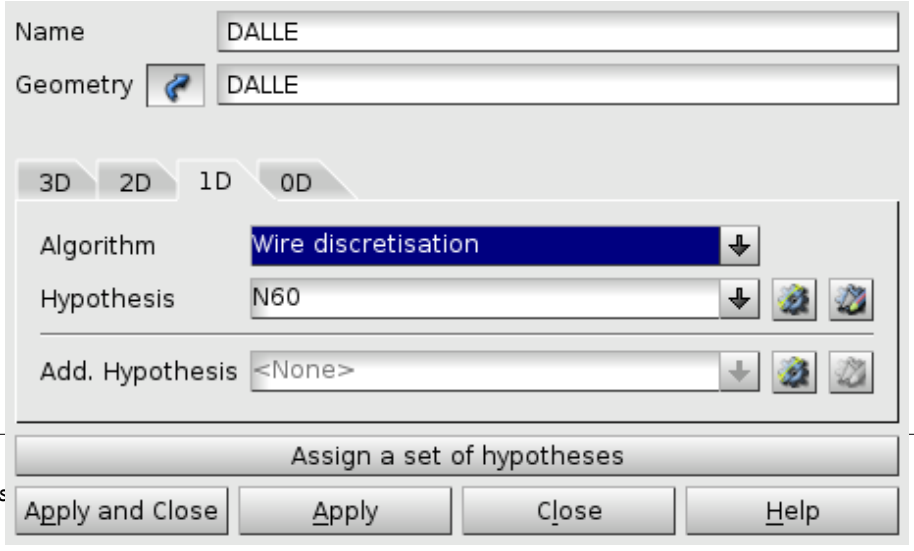
Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

2.1.2 Maillage dans SALOME

L'étape suivante est la création du maillage par le module `Mesh`. De nombreux mailleurs sont disponibles dans le logiciel.
Pour obtenir un maillage réglé et prédictible, un choix possible est :
`Hexahedron(i,j,k)/Quadrangle(Mapping)/Wire discretisation`

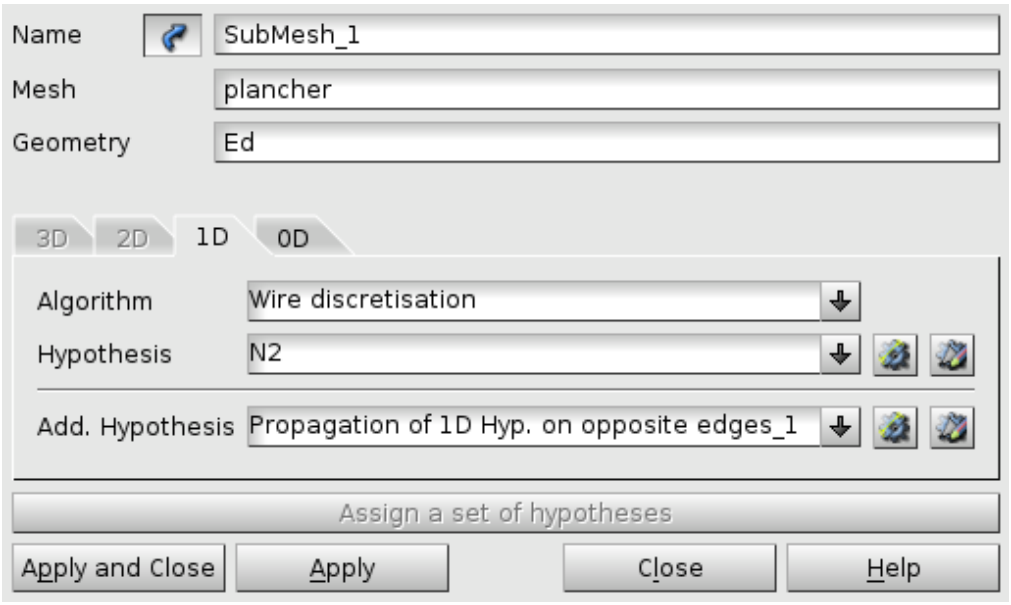






Pour éviter un maillage trop fin dans l'épaisseur de la plaque, on conseille de créer un sous-maillage sur l'une des arrêtes de coin.

N.B. : il ne faut pas oublier de « propager » la discrétisation de l'arrête de coin choisie sur les autres en le précisant dans « `Add. Hypothesis` ».



Comme compromis entre temps de calcul et précision, on pourra créer 40 éléments dans la largeur de la plaque et 2 dans l'épaisseur.
On obtient alors un maillage grossier mais ce défaut peut être compenser par des éléments quadratiques.
Pour passer d'éléments linéaires à des éléments quadratiques on utilise l'option suivante dans le menu `meshing : Modification > Convert to/from quadratic .`

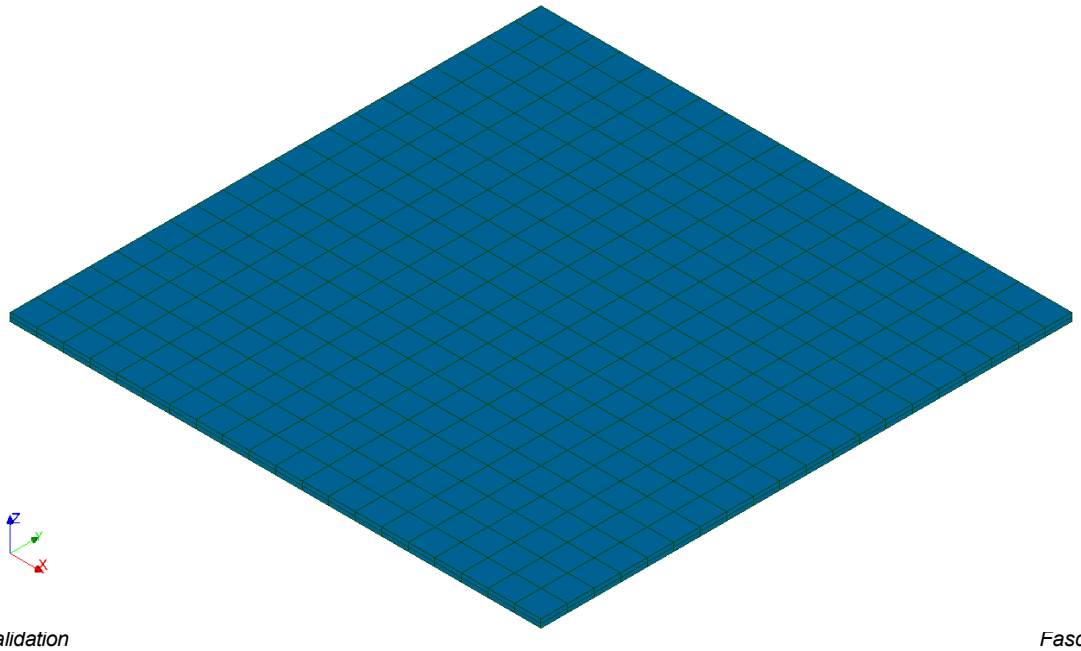
A la fin de la procédure, le maillage comprend 4725 nœuds et 800 éléments 3D.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Base Info | Element Info | Additional Info

Name:	Plate		
Object:	Mesh		
Nodes:	4725		
Elements:	*Total*	*Linear*	*Quadratic*
0D:	0		
1D (edges):	168	0	168
2D (faces):	960	0	960
Triangles:	0	0	0
Quadrangles:	960	0	960
Polygons:	0		
3D (volumes):	800	0	800
Tetrahedrons:	0	0	0
Hexahedrons:	800	0	800
Pyramids:	0	0	0
Prisms:	0	0	0
Hexagonal Prisms:	0		
Polyhedrons:	0		

Ok Help



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

2.2 Analyse modale avec *Code_Aster*

On demande des premiers modes de la structure jusqu'à une fréquence de $50\,Hz$. C'est un choix prudent puisque la fréquence d'excitation ne s'élève qu'à $15\,Hz$.
Pour ce calcul très simple, la meilleure solution est le recours à un assistant. Pour ce faire, cliquer « patte de droite » sur l'entrée `Current case` d'AsterStudy puis sur `Add Stage with Assistant` . Laissez-vous guider et lancer votre calcul dans l'onglet `History View` .
A noter qu'il peut être nécessaire d'augmenter la mémoire allouée au calcul dans la case `Memory` de la fenêtre `Run parameters` (voir Figure 2.3-1) .

2.3 Post-traitement

Pour les post-traitements simples, il est très commode de cliquer « patte de droite » dans l'entrée qui correspond au fichier `MED` de sortie dans la fenêtre `Data Files Summary` (voir Figure 2.3-1) .
Vous pouvez parcourir les différents modes en cliquant sur le bouton :

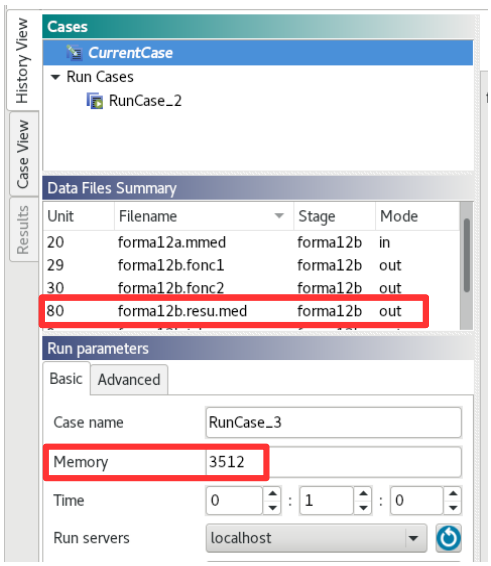


Figure 2.3-1: Paramètres du calcul

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Voici, à titre d'exemple quelques déformées modales :

Illustration 1: Premier mode (6,3 Hz)

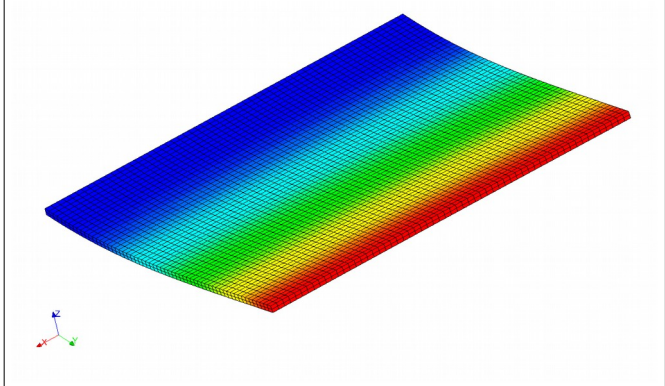


Illustration 2: Deuxième mode (15.4 Hz)

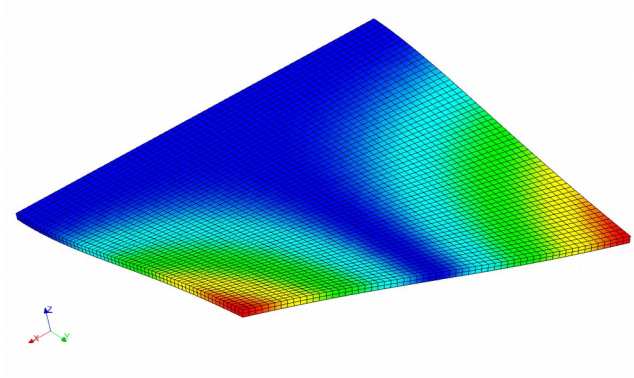


Illustration 3: Troisième mode (38.6 Hz)

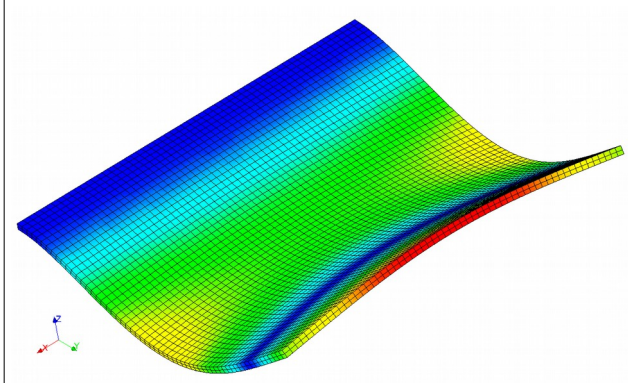
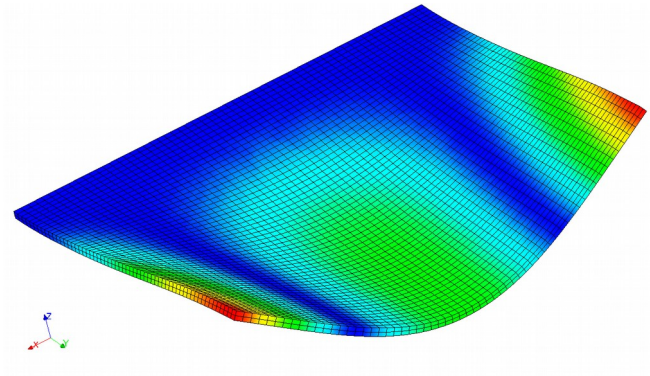


Illustration 4: Quatrième Mode (49.0 Hz)



Pour vérifier la qualité du maillage, on peut, bien entendu, faire une étude de convergence en fonction de la finesse du maillage. Mais sur une géométrie aussi simple, il est possible de trouver une bonne approximation par une formule analytique (par exemple dans *Formulas for Stress, Strain, and Structural Matrices* , Walter D. Pikey – éd. John Wiley & Sons, Inc. 1994).

Dans le cas étudié, on trouve :

$f1 = 6.23\ Hz$
$f3 = 38.16\ Hz$

Les résultats donnés par Code_Aster sont donc plutôt précis, malgré la grossièreté du maillage. Avec un maillage linéaire, les résultats n'auraient pas été aussi bons.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

3 Modélisation B – Analyse transitoire directe

3.1 Problème et esquisse du calcul

On souhaite maintenant calculer le mouvement de la plaque sur sa table vibrante. On commence par le calcul le plus naturel, le calcul direct sur base physique.
Une question essentielle réside dans la modélisation du chargement sur la plaque. On choisit ici d'utiliser une force de pesanteur d'intensité et de direction correspondant aux réglages de la table vibrante.

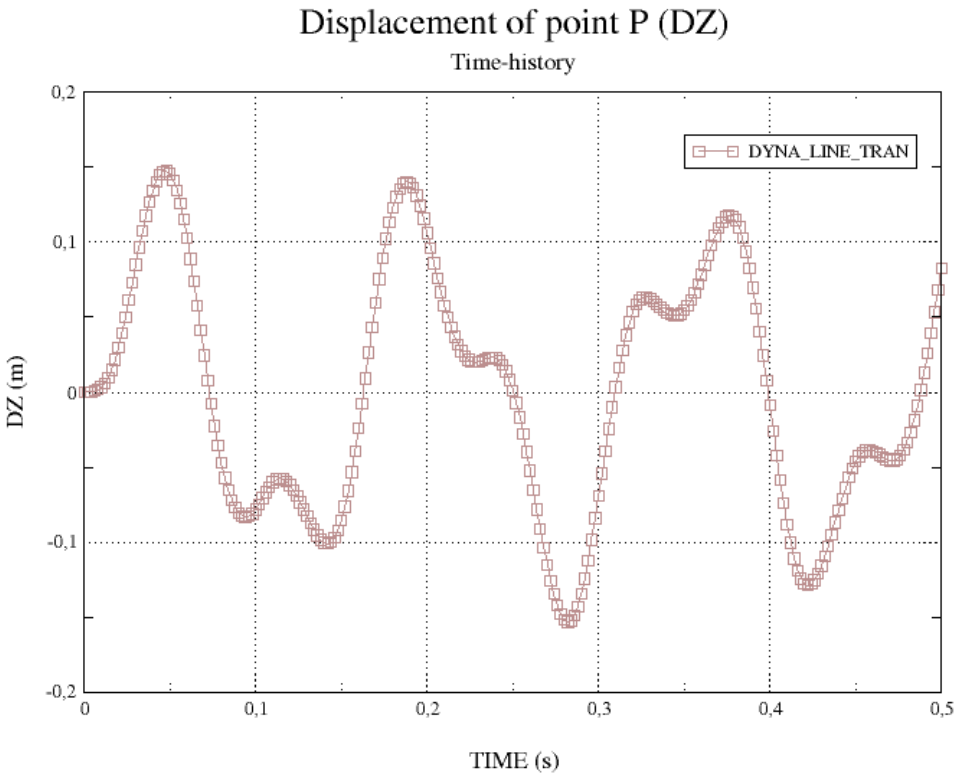
Les principales étapes du fichier de commande sont :

- début : DEBUT
- lecture du maillage: LIRE_MAILLAGE
- construction du modèle: AFFE_MODELE
- définition des matériaux : DEFI_MATERIAU
- affection des matériaux aux différents groupes du maillage: AFFE_MATERIAU
- conditions aux limites : AFFE_CHAR_MECA
- définition du chargement :
  AFFE_CHAR_MECA(PESANTEUR=_F(GRAVITE=300.,DIRECTION=(-1,0,1))
- construction des matrices de masse et de raideur et du vecteur de second membre :ASSEMBLAGE
- définition de la modulation en temps (sinus de période $15\times 2\pi$ secondes) : FORMULE
- analyse transitoire : DYNA_VIBRA(TYPE_CALCUL='TRAN', BASE_CALCUL='PHYS')
  - On étudie la réponse de la structure jusqu'à $0.5\,s$ avec un pas de temps de $0.002\,s$ (à renseigner sous le mot-clé INCREMENT)
- récupération du déplacement en un point : RECU_FONCTION
- impression de la courbe : IMPR_FONCTION

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

3.2 Résultats

Voyons la courbe des résultats :



On observe une réponse sinusoïdale à la fréquence d'excitation. Cette réponse sinusoïdale est néanmoins fortement modulée par la réponse du premier mode propre de la plaque.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

4 Modélisation C – analyse transitoire sur base modale

4.1 Problème et indices

L'analyse transitoire peut aussi se faire plus efficacement en projetant le problème sur une base modale. On se propose de comparer cette méthode avec le calcul transitoire direct.

Dans un premier temps, on propose de résoudre le transitoire sur la famille de modes déterminée dans la modélisation A. Pour ce faire, on construit une base modale avec les modes précédents, on projette les matrices et les vecteurs dans cette nouvelle base et on résout le transitoire. Ces étapes sont précisées ci-après :

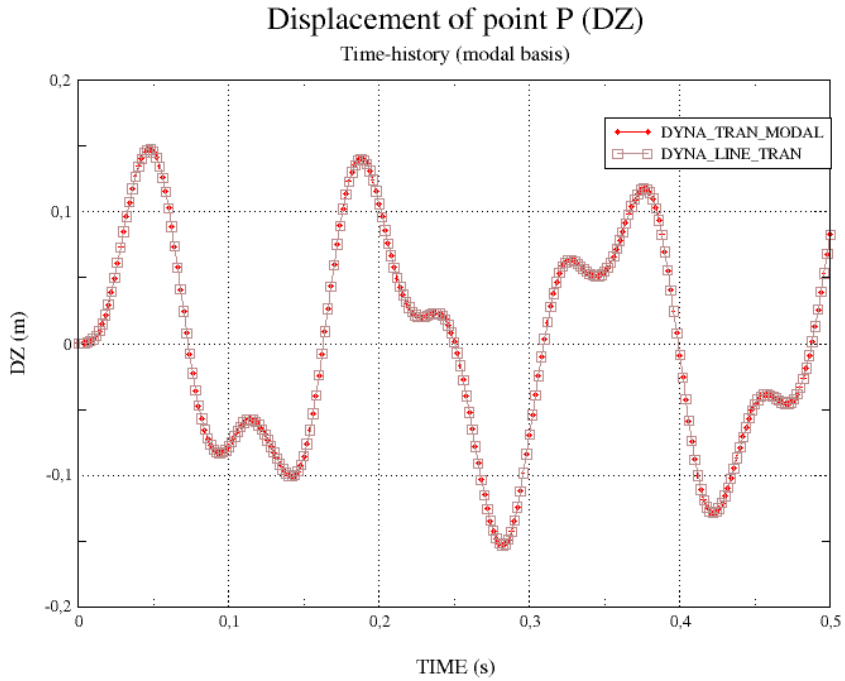
- calcul des modes comme dans la modélisation A
- construction d'un vecteur contenant le second membre par `CALC_VECT_ELEM` et `ASSE_VECTEUR`
- définition d'une base modale par `DEFI_BASE_MODALE`
- création d'une numérotation généralisée par `NUME_DDL_GENE`
  - Si la base est orthonormée, on peut l'indiquer par le mot-clé `STOCKAGE='DIAG'`
- projection des matrices de masse, de raideur et du vecteur de chargement : `PROJ_VECT_BASE` et `PROJ_MATR_BASE`
  - comme le vecteur est un chargement, on indique `TYPE_VECT='FORC'`
- calcul transitoire sur base modale : `DYNA_VIBRA(TYPE_CALCUL='TRANS', BASE_CALCUL='GENE')`
  - on calcule la réponse jusqu'à $0.5\,s$ avec un pas de temps de $0.002\,s$
- récupération du déplacement du point P `RECU_FONCTION(RESU_GENE)`
  - Il est opportun de s'interroger sur quelle base s'exprime alors ce déplacement
- impression de la courbe déplacement P/temps :`IMPR_FONCTION`

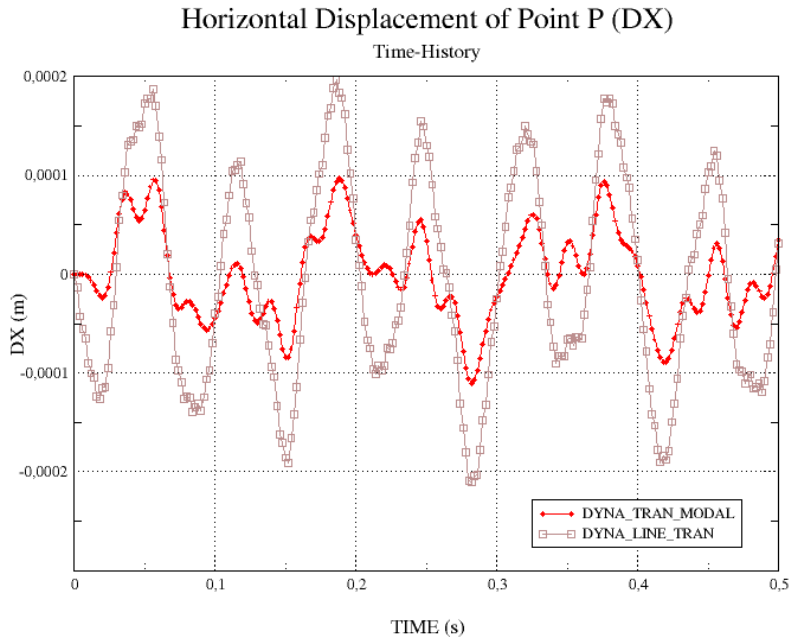
On souligne que la commande `DYNA_LINE` assure toutes ces étapes de manière très synthétique. Attention : par défaut, cette commande détermine l'enrichissement statique. Pour ne pas le faire, il faut préciser `ENRI_STAT='NON'`.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

4.2 Résultats

Pour le déplacement vertical on obtient des résultats très proches du calcul transitoire direct.





Mais si on examine les déplacements dans la direction horizontale, ils sont assez différents !!!
Quoique la base modale ait été calculée au-delà de $45\ Hz$ et qu'on ait respecté la règle habituelle recommandant de couvrir deux fois la fréquence maximale de l'excitation, dans la direction horizontale, la méthode par projection modale s'éloigne du résultat direct.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Que s'est-il passé ?
La plaque est en fait très raide dans son plan (direction horizontale). Les modes propres ne représentent donc qu'imparfaitement ce mouvement. Pour le restituer correctement, il faudrait prendre bien plus de modes propres.
Une méthode se montre toutefois bien plus performante. Il s'agit de la méthode de la correction statique, qui permet de prendre en compte la contribution « statique » de la structure au mouvement. Elle peut être réalisée de 2 manières :

- a priori : on intègre un nouveau mode dans la base modale sur laquelle résoudre le transitoire ;
- a posteriori : on conserve la base modale initiale mais on ajoute une correction à la solution obtenue.

Nous allons examiner ces 2 possibilités.

Tout d'abord la correction statique a priori. Les étapes du calcul sont les suivantes :

- calcul de la solution statiques
  - on utilise les commandes FACTORISER et RESOUDRE pour obtenir le champ de déplacement et on le range dans une structure de données résultat par CREA_RESU

- on extrait les modes de la base modale qui rassemble 90 % de l'énergie du signal d'entrée
  - on utilise pour cela la densité spectrale de puissance qui permet de déterminer une fréquence de coupure de 18,3 Hz
  - on extrait les modes par EXTR_MODE / FILTRE_MODE

- on définit une nouvelle base modale par ajout du mode statique aux modes « dynamiques » par DEFI_BASE_MODALE / RITZ . Ces derniers sont spécifiés par MODE_MECA et le premier par MODE_INTF
  - comme ces différents modes ne sont a priori pas orthogonaux entre eux, on spécifie ORTHO='OUI' pour réaliser une orthonormalisation. On doit également indiquer quelle matrice sera utilisée pour cette opération (orthogonalité dans la norme de la matrice).

- création d'une numérotation généralisée par NUME_DDL_GENE
  - Si la base est orthonormée, on peut l'indiquer par le mot-clé STOCKAGE='DIAG'

- projection des matrices de masse, de raideur et du vecteur de chargement : PROJ_VECT_BASE et PROJ_MATR_BASE
  - comme le vecteur est un chargement, on indique TYPE_VECT='FORC'

- calcul transitoire sur base modale : DYNA_VIBRA(TYPE_CALCUL='TRANS', BASE_CALCUL='GENE')
  - on calcule la réponse jusqu'à $0.5\,s$ avec un pas de temps de $0.002\,s$
  - on a recours au schéma temporel de Devogelaere-Fu par SCHEMA_TEMPS / SCHEMA='DEVOGE'

- construction de la réponse globale de la structure sur base physique par REST_GENE_PHYS

- récupération du déplacement du point P RECU_FONCTION(RESULTAT)

- impression de la courbe déplacement P/temps : IMPR_FONCTION

On souligne que la commande DYNA_LINE assure toutes ces étapes de manière très synthétique.

La correction statique a posteriori va être traitée dans la modélisation suivante.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

5 Modèle D- correction statique *a posteriori*

5.1 Procédure de calcul

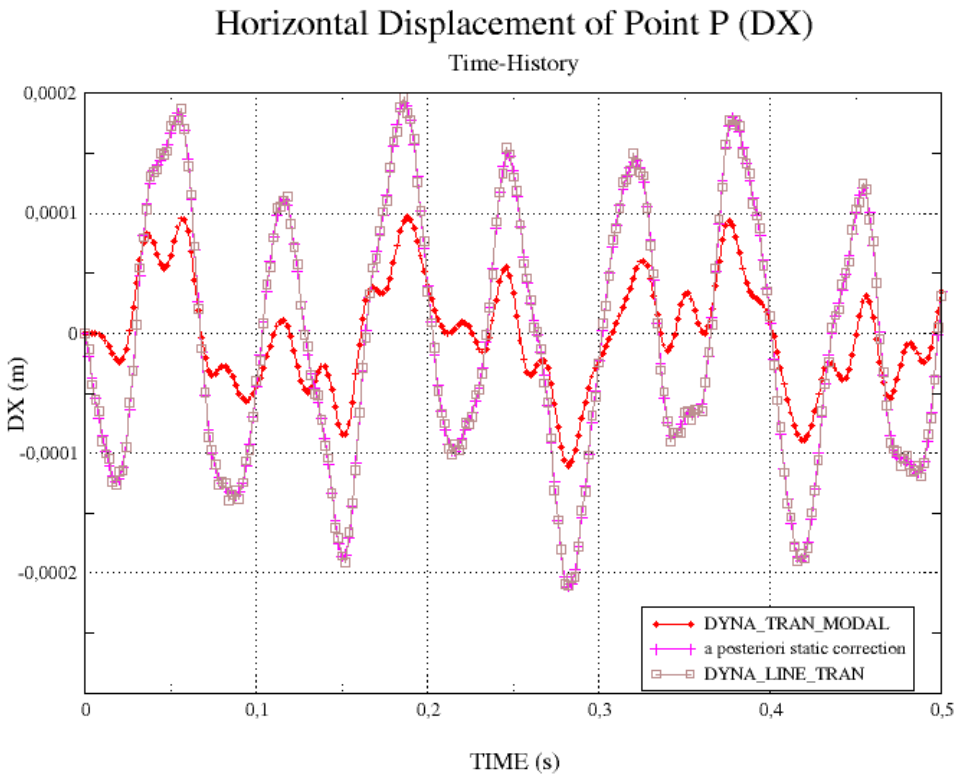
Les étapes sont assez proches de la méthode sans correction statique. Mais on ajoute quelques étapes pour prendre en compte les déformations dues aux effets statiques du chargement.
Attention ! Il ne faut pas oublier d'inclure la correction lors du retour vers la base physique.

- reprise de la base modale :POURSUITE
- définition du chargement de pesanteur : AFFE_CHAR_MECA(PESANTEUR=_F(GRAVITE=300.,DIRECTION=(-1,0,1))
- calcul élémentaire du second membre : CALC_VECT_ELEM
- assemblage du vecteur de chargement au second membre : ASSE_VECTEUR
- **calcul de la correction statique : MACRO_ELAST_MULT**
- projection des matrices de masse, de raideur et du vecteur de chargement : PROJ_BASE
- donnée de la fonction multiplicative en temps (sinus de période $15 \times 2\pi$ s) : FORMULE
- définition d'une liste d'instants (On peut prendre une liste d'instants sur $0.5\,s$ avec un pas de temps de $0.002\,s$) : DEFI_LIST_REEL
- **On a aussi besoin des dérivées premières et secondes de la fonction multiplicative en temps : formule (si on connaît leur forme analytique ou CALC_FONCTION pour une approximation numérique)**
- calcul transitoire sur base modale : DYNA_VIBRA(TYPE_CALCUL='TRANS', BASE_CALCUL='GENE') – **donner derrière MODE_CORR la déformée statique et spécifier derrière D_FONC_DT et D_FONC_DT2 les dérivées premières et secondes**
- récupération du déplacement du point P RECU_FONCTION(RESU_GENE). Ne pas oublier **CORR_STAT='OUI'**
- impression de la courbe déplacement P/temps :IMPR_FONCTION

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

5.2 Résultats

Grâce à la correction statique, les résultats sont bien meilleurs.



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

6 Modélisation E – dynamique non-linéaire

L'objectif principal de ce TP est de mettre en place un calcul non-linéaire transitoire avec prise en compte de la plasticité. Nous allons utiliser l'opérateur DYNA_NON_LINE.

6.1 Procédure de calcul

Pour calculer le comportement non-linéaire dynamique, on utilise l'opérateur d'usage général DYNA_NON_LINE. Il est proche de STAT_NON_LINE et son usage en proche. La principale différence tient au schéma d'intégration en temps et à l'influence de l'inertie (matrice de masse).

6.1.1 Données générales

Par rapport aux calculs précédents dans DYNA_VIBRA et DYNA_LINE, la différence fondamentale est que les matrices (de rigidité et de masse) et les seconds membres (chargements) ne sont pas à calculer avant l'opérateur. En effet, la commande DYNA_NON_LINE est dite « monolithique » car la matrice de rigidité varie pendant le transitoire puisqu'on résout un problème non-linéaire (qui dépend du déplacement). Il faut donc lui donner les informations comme vous le faites dans la macro-commande ASSEMBLAGE pour qu'il évalue lui même ses opérateurs :

- CHAM_MATER
- MODELE
- éventuellement CARA_ELEM si vous avez des éléments de structure ou des discrets (ce qui n'est pas le cas ici)

Les chargements sont les mêmes que dans les exercices précédents. Ils sont donnés par le mot-clef facteur EXCIT comme dans DYNA_VIBRA. Ne pas oublier d'appliquer le sinus dans FONC_MULT pour la gravité.

6.1.2 Choix du comportement non-linéaire

Le choix du comportement non-linéaire est fait dans le mot-clef facteur COMPORTEMENT de DYNA_NON_LINE. Si vous ne renseignez rien, on va considérer que le calcul est élastique en petites déformations.

Bien entendu, si vous avez un comportement non-linéaire, il faut définir les caractéristiques matériaux idoines dans DEFI_MATERIAU.

Dans cet exercice, on vous propose de la plasticité de von Mises à écrouissage cinématique linéaire :

- dans DEFI_MATERIAU, il faut choisir ECRO_CINE. On propose D_SIGM_EPSI = 2GPa (le module de Young divisé par 100) et une limite élastique SY = 200MPa. **Il est hautement recommandé de toujours renseigner le mot-clef ELAS, même quand on fait de la plasticité**

- dans DYNA_NON_LINE/COMPORTEMENT, on choisit RELATION = 'VMIS_CINE_LINE' et DEFORMATION ='PETIT'

6.1.3 Choix du schéma en temps et discrétisation temporelle

Le choix du schéma en temps est fondamental en dynamique. Par ailleurs, un problème non-linéaire ajoute une contrainte supplémentaire sur la discrétisation temporelle pour avoir une précision suffisante pour l'intégration de la non-linéarité au niveau du point de Gauss (plasticité). Dans code_aster, la majorité des schémas de discrétisation des équations du comportement sont implicites et précis, mais cette précision peut dépendre de cette discrétisation, en particulier parce qu'elle fait quelques hypothèses sur la nature du problème (voir formation avancée de code_aster). Il s'agit donc d'un paramètre numérique supplémentaire sur lequel il faut être très attentif.
Il convient de choisir une discrétisation temporelle qui a trois caractéristiques :

- compatible avec le chargement appliqué. Il faut veiller à avoir suffisamment de points de discrétisation temporelle pour bien capturer ce chargement. L'application de la règle de Shannon est une bonne

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

base : au moins une fréquence de discrétisation deux fois supérieure à celle du chargement le plus pénalisant
- la discrétisation temporelle doit également être choisie en fonction des caractéristiques du schéma en temps : condition de stabilité (pour les schémas qui en ont une) et précision
- La discrétisation temporelle doit être choisie pour intégrer précisément la partie non-linéaire

On propose de prendre un pas de temps de 0,002 s. Le calcul non-linéaire étant potentiellement très long, on recommande de s'arrêter au temps tfin = 0,1s :

```
LISTR=DEFI_LIST_REEL(DEBUT=0.,
                     INTERVALLE=_F(JUSQU_A=0.1,
                                   PAS=0.002,),)
```

La contrainte supplémentaire du comportement non-linéaire impose de permettre éventuellement à DYNA_NON_LINE de découper le pas de temps lorsqu'il échoue dans l'intégration. Pour cela, on utilise l'opréteur DEFI_LIST_INST :

```
LIS=DEFI_LIST_INST(METHODE='MANUEL',
                   DEFI_LIST=_F(LIST_INST=LISTR,),
                   ECHEC=_F(SUBD_NIVEAU=5,
                            SUBD_PAS_MINI=1e-5,
                            SUBD_METHODE='MANUEL',),)
```

Cette commande dit que le cadencement du calcul se fera sur la base de la liste d'instants LISTR (et, par exemple, on sauvegardera toutes les données du calcul à ces instants), mais qu'en cas de problème (échec d'intégration de la non linéaire par exemple), on l'autorise à découper le pas de temps en 5. La découpe est récursive : il découpe en 5, s'il échoue, il redécoupe en 5, etc. Il s'arrêtera définitivement (échec) dès qu'il atteindra un pas minimum donné par le paramètre SUBD_PAS_MINI=1E-5.

Le résultat de cette commande est à renseigner directement dans le mot clef INCREMENT/LIST_INST de DYNA_NON_LINE. **Attention à bien choisir LIS et non LISTR, sinon la découpe du pas de temps en cas d'échec ne sera pas activée .**

Dans le mot-clef SCHEMA_TEMPS, vous pouvez sélectionner votre schéma en temps. Par défaut, il s'agit d'un schéma de Newmark en déplacement. Ce schéma est inconditionnellement stable et conserve l'énergie.

6.1.4 Post-traitement

Le calcul non-linéaire est long et produit beaucoup de données par défaut. En effet, en non-linéaire, non-seulement vous aurez accès aux déplacements, vitesses et accélérations (DEPL, VITE et ACCE) mais aussi aux contraintes aux points de Gauss (SIEF_ELGA) et aux variables internes (VARi_ELGA). Sur des transitoires longs, les données produites peuvent être très volumineuses. Il est donc recommandé d'utiliser le mot-clef ARCHIVAGE pour sélectionner les instants auxquels vous voulez vos données.

Comme on veut tester l'effet de la plasticité, on va calculer le champ SIEQ_ELGA dans CALC_CHAMP pour vérifier le niveau des contraintes (critère de von Mises). Par ailleurs, on vérifie également l'hypothèse DEFORMATION='PETIT' en calculant le champ EPEQ_ELGA dans CALC_CHAMP
Enfin, à des fins de comparaisons, on peut extraire déplacements, vitesses et accélérations sur le point P de la structure grâce à la commande RECU_FONCTION :

```
DEPL_DZ = RECU_FONCTION(GROUP_NO='P',
                        NOM_CHAM='DEPL',
                        NOM_CMP='DZ',
                        RESULTAT=DYNADNL)
```

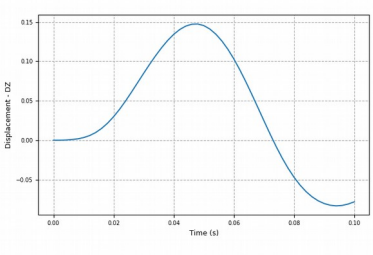
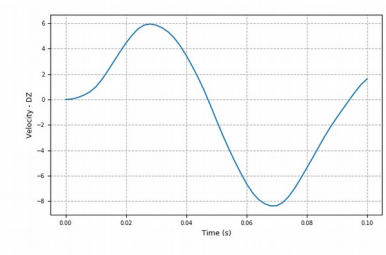
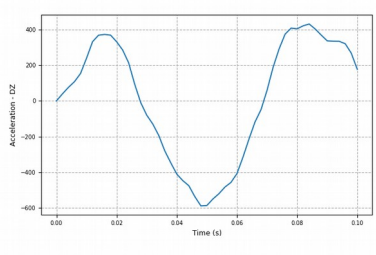
Cette fonction est ensuite imprimable par IMPR_FONCTION.
On peut aussi le faire dans le module post-process d'AsterStudy ou dans Paravis.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

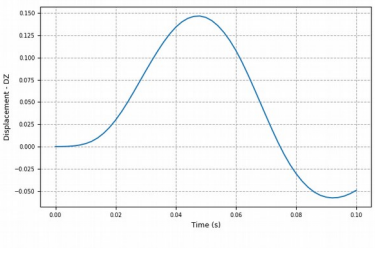
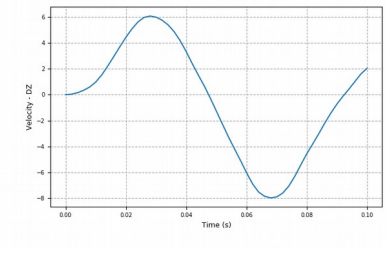
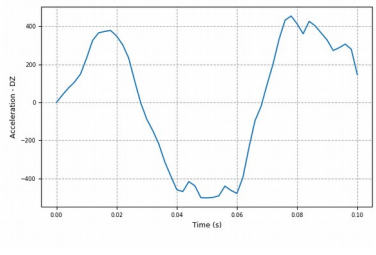
6.2 Analyse des résultats – Schéma de Newmark

A la lecture du fichier de message « .mess », on observe que le nombre d'itération s'accroît lorsque le matériau entre dans un domaine non-linéaire, *a contrario* des pas élastiques linéaires, où la convergence se fait en une unique itération.

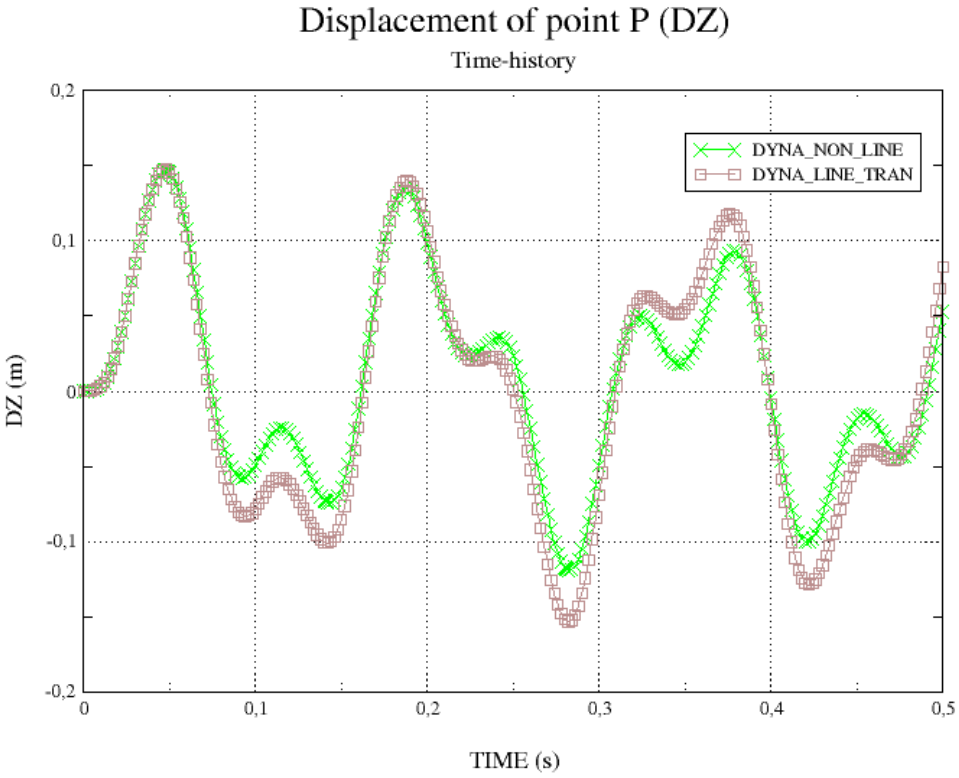
Sur le transitoire, on a les courbes suivantes en élasticité :

		
Déplacement	Vitesse	Accélération

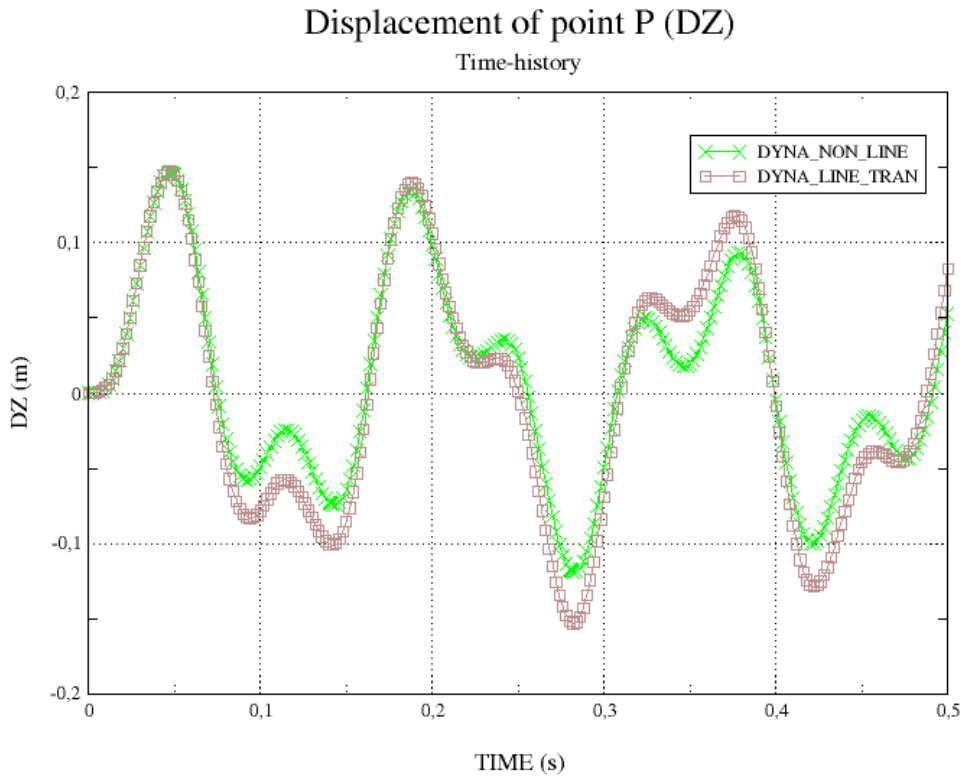
Sur le transitoire, on a les courbes suivantes en plasticité :

		
Déplacement	Vitesse	Accélération

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)



L'effet est difficile à voir (sauf sur l'accélération) parce qu'on, s'est arrêté au pas t=0.1 s pour aller plus vite. Si on compare sur une plus longue période.

On observe que, comparé au calcul élastique :
- la plasticité « amortit » l'amplitude de la réponse ;
- la fréquence apparente de la structure diminue légèrement.

Ces observations sont un signe de l'assouplissement de la structure sous l'effet de la plasticité.

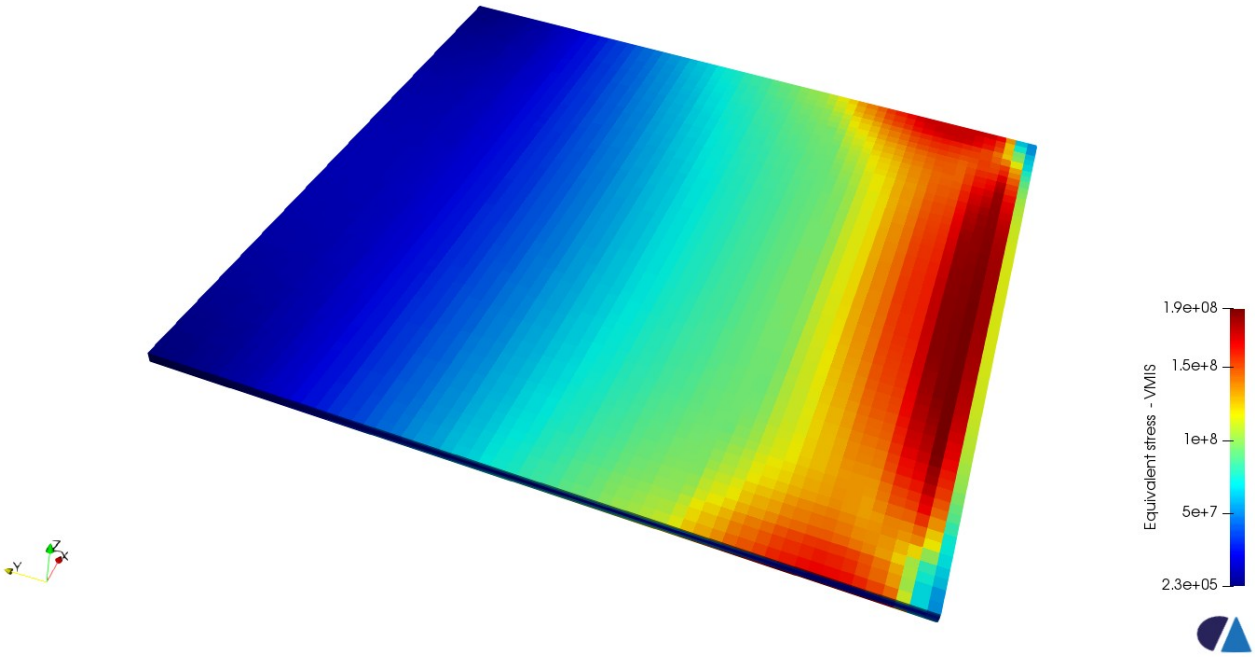
La contrainte équivalente de von Mises :

- la fréquence apparente de la structure diminue légèrement.

Ces observations sont un signe de l'assouplissement de la structure sous l'effet de la plasticité.

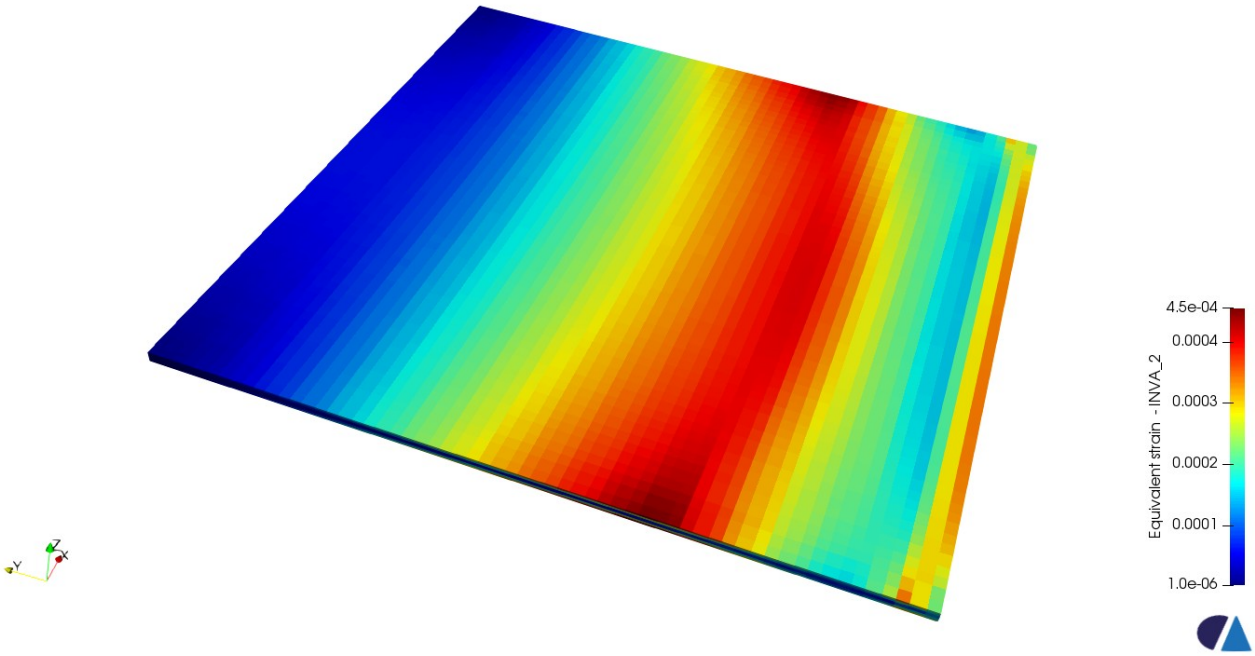
La contrainte équivalente de von Mises :

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)



Contrainte équivalente de von Mises (Pa)

On vérifie que l'hypothèse des petites déformations est bien correcte.



Deuxième invariant du tenseur des déformations (EPEQ_ELGA/INVA_2)

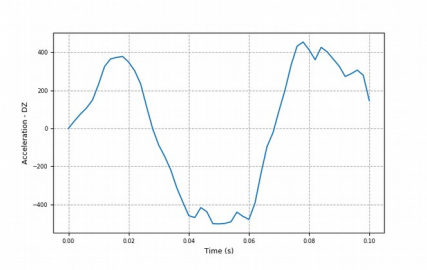
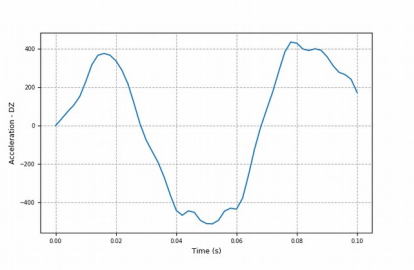
Le maximum est inférieur à 5.E-4. On est bien en petites déformations.

6.3 Effet du schéma en temps

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Comme premier exercice, on voit que l'accélération est perturbée par des effets à fréquence élevée. On va choisit un autre schéma en temps qui permet de corriger un peu ces problèmes, il s'agit du schéma HHT.

Sur le transitoire, on a les courbes suivantes en plasticité :

	
Accélération sans HHT	Accéleration avec HHT

On voit l'effet. Mais ce schéma est dissipatif (il ne conserve pas l'énergie). De manière générale en dynamique est il très recommandé de bien regarder le bilan d'énergie.

Pour cela, on peut activer le calcul des quantités d'énergie pendant tout le transitoire grâce au mot-clef ENERGIE dans DYNA_NON_LINE.
On voit alors dans le fichier message un bilan d'énergie à chaque pas de temps ainsi que le cumul depuis le début du transitoire.

Si on regarde le bilan d 'énergie avec un schéma de Newmark « classique » au dernier pas de temps

```
-------------------------------------------------------------------------------------------
| BILAN D'ENERGIE |  TRAV_EXT    |  ENER_TOT    |  ENER_CIN    |  TRAV_AMOR   |  DISS_SCH    |
|   PAS COURANT   |  2.3111E+01 | -8.7896E+01 |  1.1101E+02 |  0.0000E+00 | -2.2500E-07 |
|      TOTAL      |  1.9389E+03 |  1.5556E+03 |  3.8329E+02 |  0.0000E+00 | -6.4896E-05 |
-------------------------------------------------------------------------------------------
```

On voit que le schéma ne dissipe qu'environ 7E.-5 J sur un total de 1556 J. C'est négligeable. On voit aussi sur ce bilan l'importance relative de l'énergie cinétique et aussi l'absence d'amortissement. En effet, il n'y a pas de matrice d'amortissement dans notre calcul, on peut en ajouter (amortissement modal, hystérétique, etc.). par ailleurs, la dissipation correspondant à la plasticité n'est pas accessible ici (tout est mélangé dans l'énergie totale). Si on veut évaluer cette composante, il faut faire un post-traitement spécifique dans POST_ELEM.

Sur un schéma HHT :

```
-------------------------------------------------------------------------------------------
| BILAN D'ENERGIE |  TRAV_EXT    |  ENER_TOT    |  ENER_CIN    |  TRAV_AMOR   |  DISS_SCH    |
|   PAS COURANT   |  2.3136E+01 | -8.5582E+01 |  1.0861E+02 |  0.0000E+00 |  1.0555E-01 |
|      TOTAL      |  1.9326E+03 |  1.5489E+03 |  3.7712E+02 |  0.0000E+00 |  6.6278E+00 |
-------------------------------------------------------------------------------------------
```

On voit que le schéma dissipe un peu d'énergie. (environ 7J).

Il est possible de récupérer ces bilans d'énergie a posteriori du calcul dans une table. Il faut utiliser la commande RECU_TABLE :

```
tableNrj = RECU_TABLE(CO=DYNADNL,
                      NOM_TABLE='PARA_CALC')
```

Avec DYNADNL le concept produit par DYNA_NON_LINE.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

7 Modélisation F – dynamique linéaire avec non-linéarités localisées

7.1 Objectif

Ce cas est une introduction à l'usage de Code_Aster pour l'analyse transitoire dynamique avec non-linéarités localisées. Le comportement de choc considéré est de type élastique. La non-linéarité est introduite par une relation déplacement / vitesse / effort aux nœuds portant les non-linéarités. Le calcul est réalisé en s'appuyant sur l'opérateur de dynamique linéaire de Code_Aster DYNA_VIBRA. La résolution s'appuie sur un schéma d'intégration explicite, la non-linéarité est traitée au second membre des équations du mouvement :

- à l'instant i, les déplacements sont calculés afin d'attendre l'équilibre avec les forces calculées à l'instant i-1 ;
- les forces à l'instant i sont calculées à partir des déplacements ainsi calculé et elles sont appliquées à l'instant i+1 afin d'obtenir les déplacements à i+1.

On calcul la réponse de la plaque jusqu'à un temps final de 1 seconde, on considère une raideur normale des chocs égale à KN=1E8N/m.

Une plaque épaisse d'acier est déformée avant d'être lâchée. Deux points de contact limitent alors le mouvement de la plaque. Les deux points de contact sont disposés sous la plaque, en vis-à - vis de s extrémités du bord libre (Figure 7.1) . Quand la plaque est horizontale, le jeu est nul entre la plaque et les points de contact. La géométrie de la plaque et le matériau sont les mêmes que ceux déjà utilisées pour les modélisations a,b,c et d.

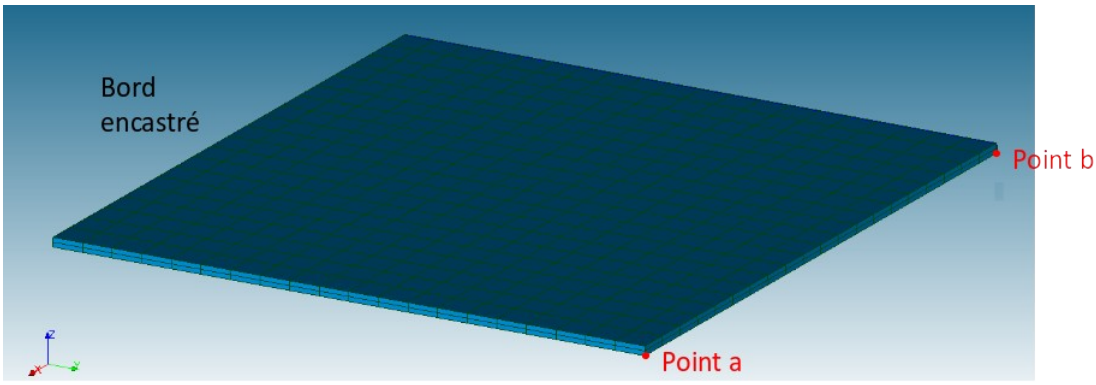


Figure 7.1. Position des points de choc.

Plus précisément, la plaque est pré-déformé de 0,25m selon la direction Z et ensuite laissée libre de vibrer. Le contact aura lieu à chaque fois que, pendant le mouvement vibratoire, les nœuds d'extrémité de la plaque situés sur la surface inférieure se retrouveront dans leur position initiale avant déformation.

7.2 Maillage

Le maillage de la plaque est le même que celui déjà utilisé pour les modélisations a,b,c,d et e. Il faut cependant créer :

- Un groupe de maille CHOC_a2 et CHOC_b2 qui contiennent les nœuds d'extrémité de la plaque positionnés sur la surface inférieure en vis-à-vis des points de contact ;
- LIBRE : il s'agit d'un groupe de mailles (SEG2) à l'extrémité libre de la plaque, reliant les groupes de nœuds CHOC_a2 et CHOC_b2 .

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- L'affectation du chargement du problème statique se fait via l'opérateur MECA_STATIQUE.
- Les conditions aux limites et le chargement sont imposées via le mot clé EXCIT.

  On se sert ensuite de la commande CREA_CHAMP afin de créer le champ de déplacement qui constituera ensuite la condition initiale du calcul dynamique. Il s'agit du champ de déplacement calculé au dernier instant su calcul statique. Attention, il est important d'utiliser, dans la construction du champ, la même numérotation des degrés de libertés qui a été utilisée lors de l'assemblage, sans le chargement de déplacement imposé.

7.3 Calcul dynamique

La mise en œuvre du calcul dynamique comporte les mêmes étapes que dans le cas de la modélisation c (calcul dynamique linéaire sur base généralisé avec prise en compte des modes statiques par correction à-priori) à quelque différence près. Les étapes communes sont les suivantes :

- on calcule la base modale via la commande CALC_MODES ;
- on calcule les modes statiques via la commande MODE_STATIQUE. Un effort unitaire est imposé au nœuds de choc b2 et a2 afin de calculer la déformée statique de la plaque dans ces conditions. Le champ de déplacements ainsi obtenu est utilisé pour enrichir la base modale de la plaque afin de prendre en compte sa réponse statique. L'enrichissement est fait par la commande DEFI_BASE_MODALE ;
- la base construite n'est pas constitué de modes orthogonaux. Il faut alors l'orthogonaliser. Pour ce-faire on s'appuie à nouveau sur la commande DEFI_MODALE ;

En revanche, les étapes spécifiques au calcul de choc sont :

- on projette ensuite les matrices de masse et de raideur sur la nouvelle base via l'opérateur PROJ_BASE, mais il faut également projeter le vecteur déplacement issu du calcul statique.
- définition de la géométrie des lieux de choc. La commande Aster qui permet de définir la géométrie des lieux de choc est DEFI_OBSTACLE (documentation utilisateur U4.44,21). Le mot clé TYPE permet de définir de manière plus précise la physique du choc. Par exemple, les mots clé PLAN_Y, PLAN_Z, CERCLE et DISCRET définissent la géométrie des contacts entre une structure mobile et un obstacle indéformable. Les types BI_PLAN_Y, BI_PLAN_Z, BI_CERCLE et BI_CERC_INT permettent de définir les lieux de contact possibles entre deux nœuds mobiles. Dans le cas présent d'une plaque qui rentre en contact avec des points fixes dans l'espace, le type PLAN_Z est choisi.
- paramétrage de l'opérateur de dynamique linéaire DYNA_VIBRA (documentation utilisateur U4.53.03). Le paramétrage de DYNA_VIBRA passe par la définition du comportement de choc. Le mot clé comportement doit être présent autant de fois que le nombre des points de contact, donc deux fois dans le cas présent. Pour chaque occurrence du mot clé comportement il faut ensuite indiquer :
  1. quel est le groupe de nœud de la structure auquel le comportement sera affecté (CHOC_a2 à la première occurrence du mot clé comportement, CHOC_b2 à la deuxième)
  2. si le choc a lieu avec frottement ou pas : mot clé FROTTEMENT
  3. la relation de CHOC (DIS_CHOC pour les contacts élastiques)
  4. la raideur selon la direction normale au choc : RIGI_NORM
  5. la géométrie du lieu de choc (Figure 7.3) :
     a) la normale à la direction de choc NORM_OBST ;
     b) l'obstacle défini par la commande DEFI_OBSTACLE, mot clé OBSTACLE ;
     c) l'origine de l'obstacle via le mot clé ORIG_OBST. Il s'agit de l'origine du repère de choc ;
     d) la normale à la direction de choc NORM_OBST ;
     e) le jeu, ou la position du plan de choc dans le repère de choc ;

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

2. les matrices de masse et de raideur (celles projetées sur la base enrichie et orthogonalisée)
3. l'état initial (ETAT_INIT) comprenant le déplacement statique projeté sur base modale
4. le schéma d'intégration (on choisi un schéma type Runge-Kutta, mot clé RUNGE_KUTTA_32), et l'incrément de temps (instant finale et pas. Un pas égal à 0.0001s a été choisi pour l'étude)
5. les matrices de masse et de raideur (celles projetées sur la base enrichie et orthogonalisée)

- *In-fine :*
  - on reporte les résultats obtenus sur base physique grâce à la commande REST_GENE_PHYS. On choisit pour cela un pas de temps de 0.001s. La définition de la discrétisation en temps pour REST_GENE_PHYS est faite via LIST_DEFI_REEL.
  - On imprime les résultats dans un fichier .med *via* la commande IMPR_RESU.

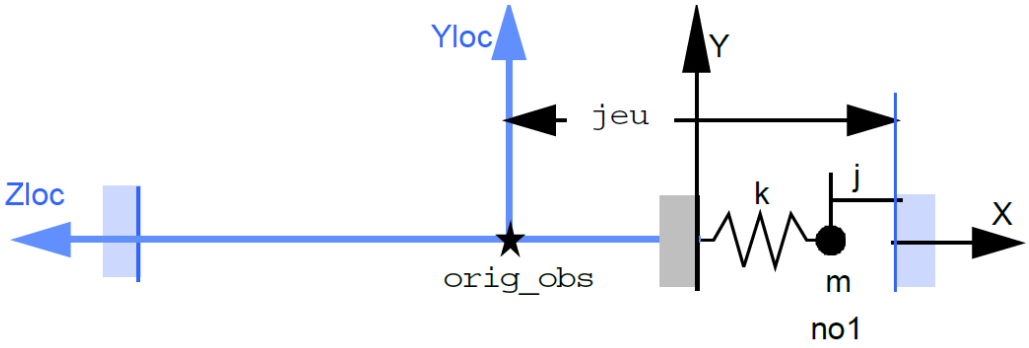


Figure 7.3-1. Géométrie des lieu de choc pour les éléments PLAN_Z.

RQ 1. Deux plans de choc symétriques par rapport à l'origine du repère de choc sont créés automatiquement. Afin d'éviter qu'il y ait contact de la structure avec le plan qui n'est pas présent dans la modélisation, il est conseillé d'éloigner l'origine du repère de l'obstacle de la structure. Dans le cas présent, il a été choisi de positionner l'origine du repère à 1 m de distance verticale par rapport à la face inférieure de la plaque. De cette manière les plans de chocs, se trouveront à la position initiale, ce veut dire en contact avec CHOC_a2 et CHOC_b2 avant pré-déformation, (un exemple est présenté à la Figure 7.3-2 pour le point a), et le second plan de choc sera assez éloigné de ne pas entrer en contact avec CHOC_a2 et CHOC_b2 à l'état initial.

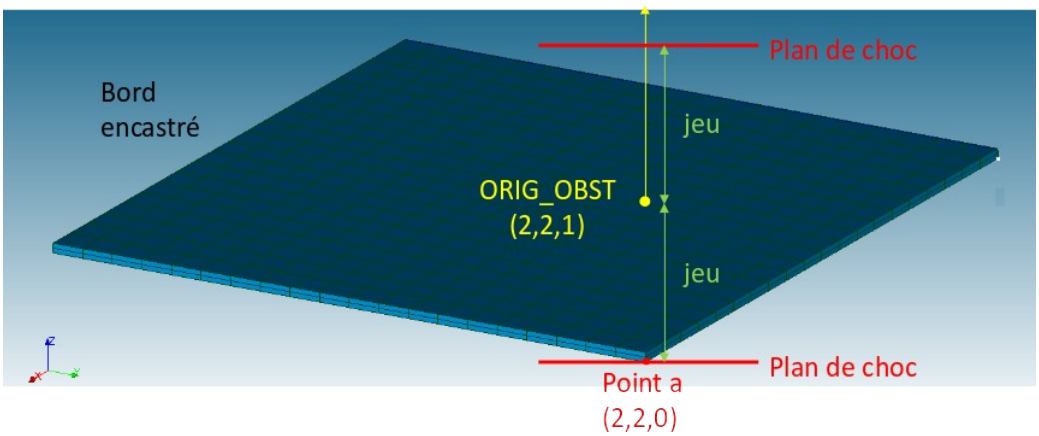


Figure 7.3-2. Géométrie du lieu de choc en correspondance du point a.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

RQ 2. le choix du pas d'intégration est un élément crucial vis-à-vis de la qualité de la solution lors de l'utilisation des schémas l'intégration explicites. Une discrétisation temporelle suffisamment raffinée doit être choisie afin d'obtenir une solution convergée. Cependant, les ressources mobilisées par le calcul dépendent du raffinement en temps. Une étude de sensibilité au raffinement temporel est nécessaire afin d'orienter le choix.

7.4 Post-traitment et impression des résultats

On récupère les déplacements et les efforts au cours du temps en correspondance des nœuds de choc grâce à la commande RECU_FONCTION.

On imprime les résultats au point b au format xmgrace grâce à la commande IMPR_RESU.

L'ouverture des fichiers xmrgace se fait par ligne de commande via la commande

xmgrage monfichier

Enfin, on rappelle que grâce à la commande POST_DYNA_MODA_T (documentation Aster U4,84,02), pour chaque non linéarité de choc, n calcule et on imprime dans une table :

- les résultats des chocs et les grandeurs associées :

  pour chaque choc, on a la valeur de l'instant où la force est maximale, la valeur de la force maximale et de l'impulsion, la durée du choc, la vitesse d'impact et le nombre de rebonds,
- les données globales du choc :

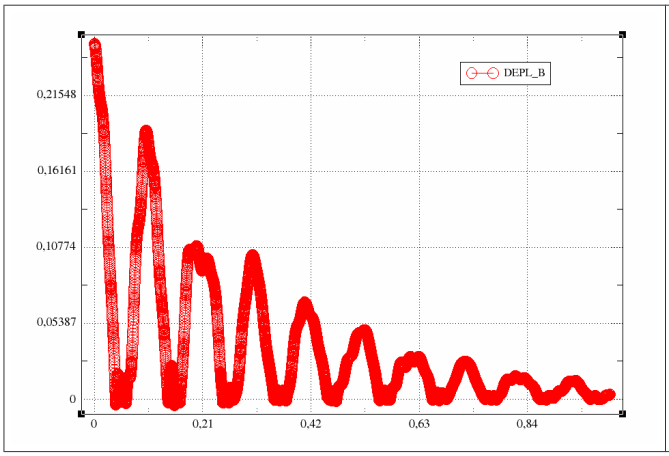
  sur l'ensemble des chocs constatés, on précise : le maximum absolu de force de choc, la valeur moyenne des maxima de forces de choc et l'écart type des extrema de force de chocs
- l'histogramme décrivant les max des forces d'impact :

  on a le nombre de classes de l'histogramme, les valeurs de ses abscisses (force min et max de chaque classe) et la densité de probabilité de la force maximale de chaque classe.

7.5 Questions

Réaliser l'étude en prenant en compte uniquement un mode vibratoire de la plaque et puis enrichir progressivement la solution.

On remarque que tous les modes entre 0 et 500 Hz jouent sur les efforts et les déplacements au point de contact et que, de plus, l'utilisation d'une base modale incomplète peut conduire à erreur dans le calcul de l'effort de choc.



•

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Déplacement au nœud b calculé avec un seul mode propre	Effort au nœud b calculé avec un seul mode propre

- **Figure 6. Résultats au point b calculés à partir d'un seul mode propre de la plaque.**

•

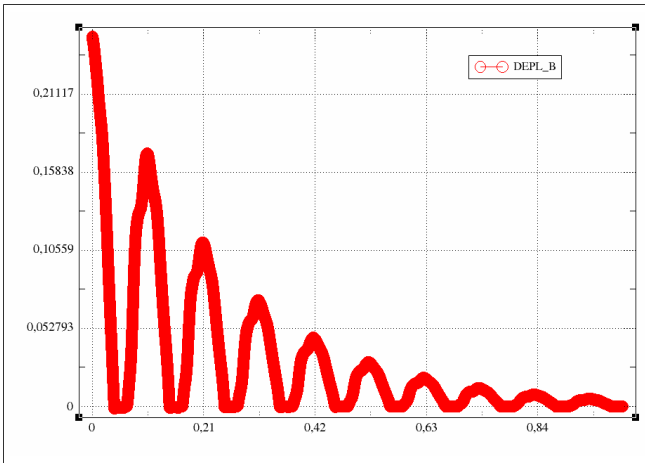
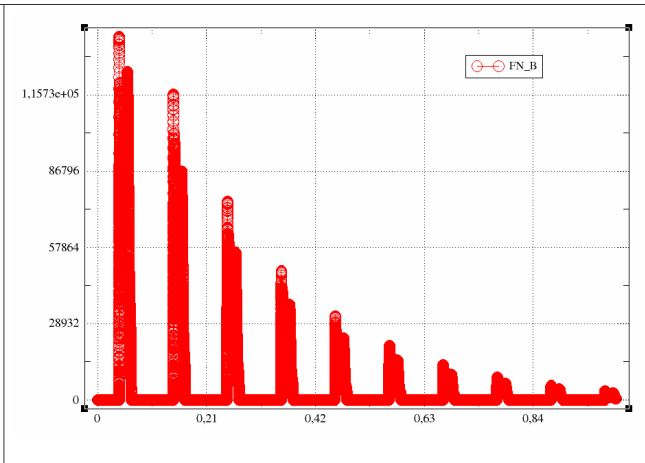
	
Déplacement au nœud b calculé avec les modes propres calculés entre 0 et 500 Hz	Effort au nœud b calculé vec les modes propres calculés entre 0 et 500 Hz

Tableau 7.1 : Résultats au nœud b calculés à partir des modes propres de la plaque calculés entre 0 et 500 Hz.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)