Bilan d'énergie en thermo-mécanique

Résumé :

On présente dans cette documentation l 'écriture du bilan d'énergie pour un calcul avec *Code_Aster*. Le calcul du bilan d'énergie peut être activé dans les opérateurs STAT_NON_LINE [U4.51.03], DYNA_NON_LINE [U4.53.01] et DYNA_VIBRA [U4.53.03] sur base physique grâce à l'option ENERGIE=_F(). Cette fonctionnalité couvre donc les calculs thermo-hydro-mécaniques en quasi-statique et en dynamique. Sont exclus les calculs thermiques (opérateurs THER_LINEAIRE , THER_NON_LINE et THER_NON_LINE_MO) et les calculs modaux (opérateur DYNA_VIBRA sur base modale).

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

Table des Matières

1 Calcul du bilan d'énergie d'un calcul.....
1.1 Travail d'une force.....3
1.2 Bilan d'énergie.....4
1.3 Construction des différents termes d'énergie.....5
1.3.1 Travail des forces extérieures.....5
1.3.2 Travail des forces de liaison.....6
1.3.3 Travail des forces d'amortissement.....6
1.3.4 Énergie de déformation totale.....6
1.4 Prise en compte d'un état initial.....6
1.4.1 Cas des reprises à partir d'un état calculé au préalable.....7
1.4.2 Cas d'un calcul avec un état initial explicitement donné.....7
1.4.3 État énergétique initial.....8
2 Aide à l'utilisation et applications.....
2.1.1 Conseils.....9
2.1.2 Quelques applications.....9
2.1.2.1 Cas-test ssnp155a.....9
2.1.2.2 Cas-test sdlv120a.....11
2.1.2.3 Cas-test wtnv109a.....12

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

1 Calcul du bilan d'énergie d'un calcul

Le bilan d'énergie d'un calcul peut être une information très utile. D'une part, il permet de porter un regard critique sur la qualité des résultats, au même titre qu'un résidu d'équilibre dans l'algorithme de Newton. D'autre part, il renseigne sur les phénomènes physiques mis en jeu et apporte des réponses aux questions suivantes : quelle est l'énergie transmise à mon système ? Que devient-elle ?

Pour ce faire, on établit dans ce qui suit l'écriture du bilan d'énergie pour un calcul avec *Code_Aster* sur le modèle complet. Nous distinguons la nature de chaque terme d'énergie et nous attachons à définir sa provenance.

1.1 Travail d'une force

Considérons l'évolution à différents instants t_i d' un solide déformable soumis à une force extérieure variable $\mathbf{F}(t)$. Soit $\mathbf{U}_i$ le champ de déplacement solution pour chaque instant t_i et $\mathbf{F}_i=\mathbf{F}(t_i)$. La courbe de l'effort extérieur en fonction du déplacement est donnée sur la Figure 1.1-1. Du point de vue énergétique, l'incrément de travail extérieur fourni au système entre deux instants consécutifs (t_0,t_1) représente l'aire sous la courbe, qui se calcule par la méthode des trapèzes :

$$A_1=\int_{t_0}^{t_1}\mathbf{F}(t).\dot{\mathbf{U}}(t)=\frac{\mathbf{F}_0+\mathbf{F}_1}{2}.(\mathbf{U}_1-\mathbf{U}_0)=\bar{\mathbf{F}}_1.\Delta\mathbf{U}_1 \quad (1)$$

où :

- $\bar{\mathbf{F}}_1$ représente la force moyenne sur l'incrément de temps (l'indice est choisi comme étant celui du temps de fin),
- $\Delta\mathbf{U}_1$ représente l'incrément de déplacement entre t_0 et t_1.

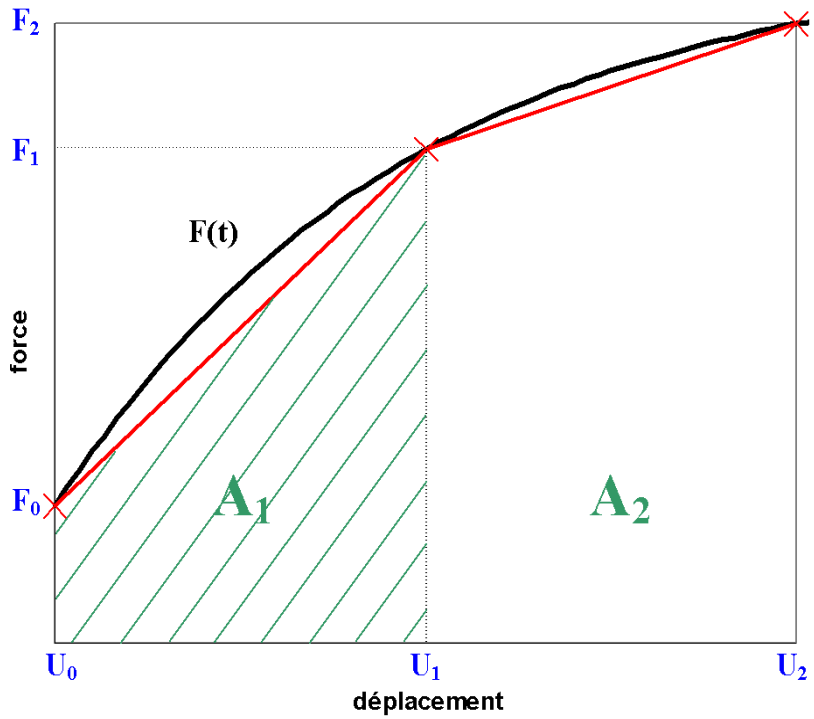


Figure 1.1-1: Courbe effort - déplacement.

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

L'incrément de travail d'une force quelconque peut donc être considéré comme le produit scalaire de deux vecteurs : la force moyenne sur le pas de temps et l' incrément de déplacement.

Cette méthode du calcul de l'incrément de travail d'une force est pratique dans le cadre de la simulation numérique, puisque la solution est connue à différents instants uniquement, correspondant à la discrétisation temporelle choisie.

1.2 Bilan d'énergie

Considérons l'équation d'équilibre dynamique d'un système sous sa forme discrétisée en espace :

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}(t)+\mathbf{C}(t)\dot{\mathbf{U}}(t)+\mathbf{R}\left(\mathbf{U}(t),\dot{\mathbf{U}}(t),t\right)=\mathbf{L}(t) \quad (2)$$

où :

- $\mathbf{U}$, $\dot{\mathbf{U}}$ et $\ddot{\mathbf{U}}$ sont les vecteurs des déplacements, vitesses et accélérations aux nœuds,
- $\mathbf{M}$ et $\mathbf{C}$ sont les matrices de masse et d'amortissement,
- $\mathbf{R}$ représente les forces internes (en élasticité linéaire, il s'agit du terme $\mathbf{K}\,\mathbf{U}$), dont on a ôté ce qui est considéré comme l es forces d'amortissement,
- $\mathbf{L}$ est le vecteur des efforts extérieurs.

Cette écriture, inspirée de [R5.05.05], est ici simplifiée par rapport à l'écriture originale qui fait intervenir des multiplicateurs de Lagrange pour les conditions aux limites de Dirichlet et les conditions unilatérales. Notons que la matrice d'amortissement $\mathbf{C}(t)$ peut dépendre du temps si sa construction est basée sur la matrice de raideur tangente et non pas élastique (option AMOR_RAYL_RIGI dans l'opérateur DYNA_NON_LINE).

Chaque terme de l'équation (2) est homogène à une force. L'évolution énergétique du système entre deux instants de calcul consécutifs t_0 et t_1 se traduit directement par le travail de chacune de ces forces. En reprenant les notations de grandeur moyenne et incrément de grandeur utilisées dans l'équation (1), on obtient :

- l' incrément d'énergie cinétique :

$$\Delta E_{cin}=\int_{\mathbf{U}_0}^{\mathbf{U}_1}\left(\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}\right)^{\mathrm{T}}\mathbf{dU}=\int_{t_0}^{t_1}\left(\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}\right)^{\mathrm{T}}\dot{\mathbf{U}}\,dt=\left[\frac{1}{2}\dot{\mathbf{U}}^{\mathrm{T}}\mathbf{M}\dot{\mathbf{U}}\right]_{t_0}^{t_1}=\bar{\dot{\mathbf{U}}}_1^{\mathrm{T}}\mathbf{M}\boldsymbol{\Delta}\dot{\mathbf{U}}_1 \quad (3)$$

On retrouve une expression identique à l'équation (1) en considérant comme force $\mathbf{F}=\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}$, l'opérateur $\mathbf{M}$ étant supposé constant.

- l'incrément d'énergie dissipée par amortissement :

$$\Delta W_{amor}=\overline{\mathbf{C}\left(\mathbf{t}\right)\dot{\mathbf{U}}_1}^{\mathrm{T}}.\boldsymbol{\Delta}\mathbf{U}_1 \quad (4)$$

Comme la matrice d'amortissement peut être dépendante du temps, il faut évaluer la grandeur $\mathbf{C}\left(\mathbf{t}\right)\dot{\mathbf{U}}$ à t_0 et à t_1 , puis en faire la moyenne. Cette étape est négligée, et on calcule en fait la grandeur suivante :

$$\Delta W_{amor}=\overline{\dot{\mathbf{U}}_1^{\mathrm{T}}\mathbf{C}\left(t_1\right)}\boldsymbol{\Delta}\mathbf{U}_1 \quad (5)$$

L'énergie dissipée par amortissement est donc calculée de manière approchée.

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

- L'incrément d'énergie de déformation totale :

$$\Delta E_{tot} = \overline{\mathbf{R}}_I^{\mathrm{T}} \Delta \mathbf{U}_I \tag{6}$$

- L'incrément de travail des efforts extérieurs :

$$\Delta W_{ext} = \overline{\mathbf{L}}_I^{\mathrm{T}} \Delta \mathbf{U}_I \tag{7}$$

En présence de contact frottant, un terme d'effort supplémentaire apparaît dans l'équation d'équilibre, correspondant à la force de contact. Du point de vue énergétique, sa contribution se calcule aisément de manière similaire à (1), mais elle ne peut être prise en compte dans aucune des énergies définies ci-dessus. On crée donc une nouvelle énergie qui représente l'énergie emmagasinée et/ou dissipée par les forces de liaisons, que nous nommons ΔW_{liai} . Le bilan d'énergie mécanique du système s'écrit alors :

$$\Delta W_{ext} = \Delta E_{cin} + \Delta E_{tot} + \Delta W_{amor} + \Delta W_{liai} \tag{8}$$

Dans l'hypothèse où la résolution est strictement exacte, le terme de gauche est égal à la somme des termes de droite. Dans la réalité, le schéma numérique de résolution induit des écarts pour différentes raisons :

- l'algorithme de Newton est un algorithme de résolution itératif, dont la convergence est détectée lorsque le résidu d'équilibre relatif des forces est inférieur à un certain critère. Par définition, la solution trouvée est donc correcte à une tolérance près, ce qui crée inévitablement un écart d'équilibre dans le bilan des énergies. On peut alors améliorer le bilan d'énergie en durcissant le critère de convergence, mais la précision atteinte avec le critère par défaut est généralement satisfaisante.
- Parmi les schémas numériques d'intégration temporelle, seuls certains ne sont pas dissipatifs. Modifier les valeurs par défaut de ces schémas, tels que le schéma de Newmark, entraîne une dissipation numérique. L'utilisateur pourra se référer à la documentation [R5.05.05] pour plus d'informations sur la dissipation des schémas numériques d'intégration temporelle.

Le bilan d'énergie trouve ici une première utilité d'importance : il permet de quantifier l'énergie dissipée par le schéma numérique. Dans les calculs de chocs par exemple, il est courant d'utiliser des schémas numériques dissipatifs pour filtrer les hautes fréquences. On définit ainsi l'énergie dissipée par le schéma numérique :

$$\Delta W_{sch} = \Delta W_{ext} - \Delta E_{cin} - \Delta E_{tot} - \Delta W_{amor} - \Delta W_{liai} \tag{9}$$

1.3 Construction des différents termes d'énergie

Une énergie est considérée comme le travail d'une force. Numériquement, le calcul d'un terme d'énergie consiste tout d'abord à construire un vecteur global correspondant à la somme de toutes les forces dont la contribution au bilan d'énergie est stockée dans le même terme. Il existe de nombreux vecteurs de force et nous définissons dans cette partie ceux qui alimentent chacun des termes d'énergie.

1.3.1 Travail des forces extérieures

On définit comme travail extérieur le travail :

- de toutes les forces associées aux commandes AFFE_CHAR_MECA et AFFE_CHAR_MECA_F, à l'exception de FORCE_SOL comptabilisée dans le travail des forces de liaison,
- des forces issues du calcul par sous-structuration (utilisation de macro-éléments),
- de toutes les forces associées aux commandes AFFE_CHAR_CINE et AFFE_CHAR_CINE_F. Au sens strict du terme, la commande AFFE_CHAR_CINE permet de définir des conditions aux limites de déplacement imposé, dont le travail devrait être comptabilisé en tant qu'énergie de liaison. Pour des raisons pratiques, sa contribution est ajoutée au travail extérieur. En général, il est possible de

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

récupérer la force correspondant à ce déplacement imposé. Certains cas peuvent néanmoins poser problème, comme par exemple le cas-test ssnp155a (voir § 2.1.2.1).

1.3.2 Travail des forces de liaison

On définit comme travail des forces de liaison le travail :

- des forces de contact et de frottement issues de la commande DEFI_CONTACT ,
- de la force issue des éléments de frontière absorbante,
- de la force issue de l'option FORCE_SOL dans la commande AFFE_CHAR_MECA.

1.3.3 Travail des forces d'amortissement

On définit comme travail des forces d'amortissement le travail :

- de la force d'amortissement issue de la matrice d'amortissement (terme $\mathbf{C}\dot{\mathbf{U}}=\left(\alpha\mathbf{K}+\beta\mathbf{M}\right)\dot{\mathbf{U}}$),
- de la force d'amortissement modal (mot-clé AMOR_MODAL dans les opérateurs de calcul).

1.3.4 Énergie de déformation totale

L'énergie de déformation totale regroupe toutes les contributions qui nécessitent d'intégrer une loi de comportement. Cela peut conduire à des choix arbitraires. Par exemple, on comptabilise dans l'énergie de déformation totale la contribution des éléments de joints ou des éléments cohésifs, bien qu'il serait plus naturel de les intégrer au calcul de l'énergie liée aux liaisons. De même, lorsqu'on utilise des lois de comportement pour représenter le contact avec les éléments discrets, la contribution est intégrée à l'énergie de déformation totale alors qu'elle serait plus à sa place dans l'énergie liée aux liaisons. La règle est que, lorsqu'il s'agit d'un comportement porté par des éléments finis définis dans le modèle, alors la contribution est ajoutée à E_{tot} .

1.4 Prise en compte d'un état initial

Considérons l'exemple d'un système masse-ressort soumis à un choc initial. Dans *Code_Aster*, l'utilisateur peut simplement donner une accélération initiale. Cela correspond à l'équation suivante :

$$\begin{gathered} m\,\ddot{u}(t)+k\,u(t)=F(t) \\ u=0 \\ F=0 \\ \ddot{u}\neq 0 \end{gathered}$$

avec comme conditions initiales : (10)

$$\begin{gathered} u(0)=0 \\ \dot{u}(0)=0 \\ F(0)=0 \\ \ddot{u}(0)\neq 0 \end{gathered}$$

On constate qu'il y a une incompatibilité : l'utilisateur fournit un état initial non équilibré. En toute rigueur, les équations de la dynamique étant du second ordre en temps, il ne peut y avoir qu'un déplacement ou une vitesse imposé à l'instant initial. Si on souhaite imposer une accélération initiale, il faudrait en principe donner la force qui équilibre l'équation du système. Le schéma numérique n'en a pas besoin car cela n'influe pas sur la résolution. Néanmoins, cela influe sur le calcul du bilan des énergies car sans cette force initiale, le bilan est incorrect. En effet, l'équilibre énergétique sur le premier pas de temps s'écrit alors :

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

$$\begin{aligned} W_{ext} &= E_{tot} + E_{cin} \\ W_{ext} &= 0 \\ E_{tot} &> 0 \\ E_{cin} &> 0 \end{aligned} \tag{11}$$

Il manque la contribution de la force extérieure qui correspond à cette accélération initiale. En la prenant en compte, on obtient alors un terme W_{ext} non nul.

Dans le cas général, le bilan d'énergie ne peut être correct que si le calcul démarre à partir d'un état équilibré. En l'absence d'état initial, cette condition est implicitement remplie. Une attention particulière doit donc être portée aux différentes possibilités d'introduire un état initial non vierge.

1.4.1 Cas des reprises à partir d'un état calculé au préalable

Dans cette partie, on s'intéresse des reprises à partir d'un état calculé au préalable, à savoir l'utilisation dans ETAT_INIT des mots-clés :

- EVOL_NOLI pour STAT_NON_LINE et DYNA_NON_LINE ,
- RESULTAT pour DYNA_VIBRA.

Afin de calculer chacun des termes d'énergie de l'équation (8), il faut donc disposer au pas de reprise :

- des vecteurs nodaux de déplacement, vitesse et accélérations,
- des matrices de masse et d'amortissement,
- des forces internes résultant de l'état de contrainte,
- des vecteurs de forces $\mathbf{F}_{ext}$, $\mathbf{F}_{amor}$ et $\boldsymbol{F}_{liai}$.

Les vecteurs nodaux de déplacement, vitesse et accélération, ainsi que la matrice de masse et les forces internes, sont toujours disponibles. La matrice d'amortissement n'est en fait pas nécessaire puisqu'on utilise l'équation (5) pour évaluer l'énergie dissipée par amortissement, où cette matrice est évaluée à l'instant t_1 . Seuls les trois derniers vecteurs de force nécessitent une attention particulière.

Les vecteurs $\mathbf{F}_{amor}$ et $\mathbf{F}_{liai}$ doivent avoir été archivés car il est impossible de les recréer. Ainsi, lorsqu'on active le calcul du bilan d'énergie, on active automatiquement l'archivage de deux champs nodaux supplémentaires dénommés FORC_AMOR et FORC_LIAI. Ces champs sont destinés à être relus en cas de reprise pour correctement initialiser le calcul du bilan d'énergie.

Enfin, concernant le vecteur $\mathbf{F}_{ext}$ des forces extérieures, pour STAT_NON_LINE et DYNA_NON_LINE , il est recalculé au temps de reprise t_0 conformément à l'équation (2) d'équilibre du système :

$$\mathbf{F}_{ext}\left(t_0\right) = \mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}\left(t_0\right) + \mathbf{C}\left(t_1\right)\dot{\mathbf{U}}\left(t_0\right) + \mathbf{R}\left(\mathbf{U}\left(t_0\right), \dot{\mathbf{U}}\left(t_0\right)\right) \tag{12}$$

Dans le cas d'un calcul avec DYNA_VIBRA sur base physique, on sauvegarde directement la force extérieure FORC_EXTE.

1.4.2 Cas d'un calcul avec un état initial explicitement donné

L'utilisateur peut être amené à fournir un état initial non vierge sous la forme d'une combinaison des champs suivants :

- un champ de déplacement (mot-clé DEPL)
- un champ de vitesse (mot-clé VITE)
- un champ d' accélération (mot-clé ACC E)
- un champ de contrainte (mot-clé SIGM)
- un champ de variables internes (mot-clé VARI)

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

La donnée des champs de déplacement, de vitesse et d'accélération est automatiquement gérée comme dans le cas d'un état initial issu d'un précédent calcul, à l'aide de l'équation (12). Notons que les schémas en temps des opérateurs de dynamique DYNA_NON_LINE et DYNA_VIBRA sont amené s à calculer une accélération initiale si l'utilisateur n'en fournit pas. Ce cas est géré de la même manière. À titre d'exemple, dans le cas du système masse-ressort soumis à une accélération initiale, nous construisons le vecteur F_{ext} initial suivant :

$$\mathbf{F}_{ext}(t_0) = m\ddot{u}(t_0) \tag{13}$$

La donnée d'un champ de contrainte ou de variables internes est automatiquement gérée également, puisque ces grandeurs interviennent dans le calcul du terme $\mathbf{R}\left(\mathbf{U}(t_0), \dot{\mathbf{U}}(t_0)\right)$ de l'équation (12).

1.4.3 État énergétique initial

Il est important de noter que le bilan d'énergie est fourni sous forme incrémentale. Ainsi, il n'est possible de calculer qu'une variation des différents termes d'énergie entre deux instants de calcul. C'est d'ailleurs cette information qui est utile afin de connaître les différents transferts d'énergie. Lorsque l'état initial d'un calcul est fourni à partir d'un résultat (voir 1.4.1), l'état d'énergie initiale est récupéré. En revanche, lorsque l'état initial n'est pas donné par une structure de données « résultat », on ne peut ni récupérer ni calculer l'état énergétique initial. En conséquence, les différents termes du bilan d'énergie sont initialisés à 0.

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

2 Aide à l'utilisation et applications

2.1.1 Conseils

Dans ce qui suit, nous indiquons quelques bonnes pratiques facilitant l'obtention d'un bilan d'énergie satisfaisant.

- **Utiliser un formalisme adapté**

L'ensemble des calculs présentés s'inscrit dans une configuration Lagrangienne. En effet, on fait intervenir un terme d'effort moyen sur le pas de temps, obtenu en sommant une force écrite au pas précédent avec une force écrite au pas courant. Cela ne pose pas de problème pour l'opérateur DYNA_VIBRA. Mais cela peut engendrer un bilan d'énergie incorrect pour STAT_NON_LINE et DYNA_NON_LINE , lorsque le formalisme employé défini sous le mot-clé facteur COMPORTEMENT est :

- PETIT_REAC
- SIMO_MIEHE

Dans ces deux cas , il est conseillé de faire de petits pas de temps pour limiter l'écart entre les configurations de calcul d'un pas de temps à l'autre.

- **Partir d'un état équilibré**

Une première précaution est de partir d'un état initial équilibré. L'équilibre est assuré en calculant la force extérieure F_{ext} qui équilibre l'état initial (voir § 1.4.1). Dans la majorité des cas, cela correspond à la réalité. Il est néanmoins vivement conseillé de partir d'un état déjà équilibré lorsque cela est possible.

- **Utiliser des critères de convergences adaptés**

Un autre point important à signaler est l'influence du critère de convergence sur la qualité du bilan d'énergie. La convergence du calcul est assurée à une tolérance près, à travers la valeur de RESI_GLOB_RELA ou RESI_GLOB_MAXI. Lorsque ce critère est trop lâche, la dissipation numérique peut devenir non négligeable. En cas de doute, il est conseillé de relancer le calcul avec un critère plus resserré, afin de vérifier que l'énergie dissipée par l'intégration diminue.

- **Préférer la commande AFFE_CHAR_MECA à la commande AFFE_CHAR_CINE**

La commande AFFE_CHAR_CINE est particulière. Elle consiste, lors de la résolution, à supprimer les degrés de liberté où un déplacement est imposé. Cette fonctionnalité est intéressante, puisqu'elle permet de réduire la taille du système à résoudre. Néanmoins, elle peut poser problème dans l'évaluation du bilan des énergies dans certaines conditions, certes assez rares. Un exemple est donné dans la partie 2.1.2.1.

2.1.2 Quelques applications

Dans cette partie, nous choisissons quelques cas-tests pour en décrypter le bilan d'énergie. Les calculs sont réalisés avec la version 11.1.12 de *Code_Aster*.

2.1.2.1 Cas-test ssnp155a

Ce test modélise un emboutissage d'une tôle par un poinçon dans une matrice (figure 2.1.2.1-1). La structure est modélisée en déformations planes. On tient compte de la symétrie pour ne représenter qu'une moitié. Le poinçon et la matrice sont modélisés en éléments de bord, sur lesquels on impose un déplacement à l'aide de la commande AFFE_CHAR_CINE. On obtient alors en fin de calcul un bilan d'énergie manifestement incorrect, puisque W_{ext} est nul et puisque W_{sch} devrait être très faible par rapport aux autres termes d'énergie (tableau 2.1.2.1-1).

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

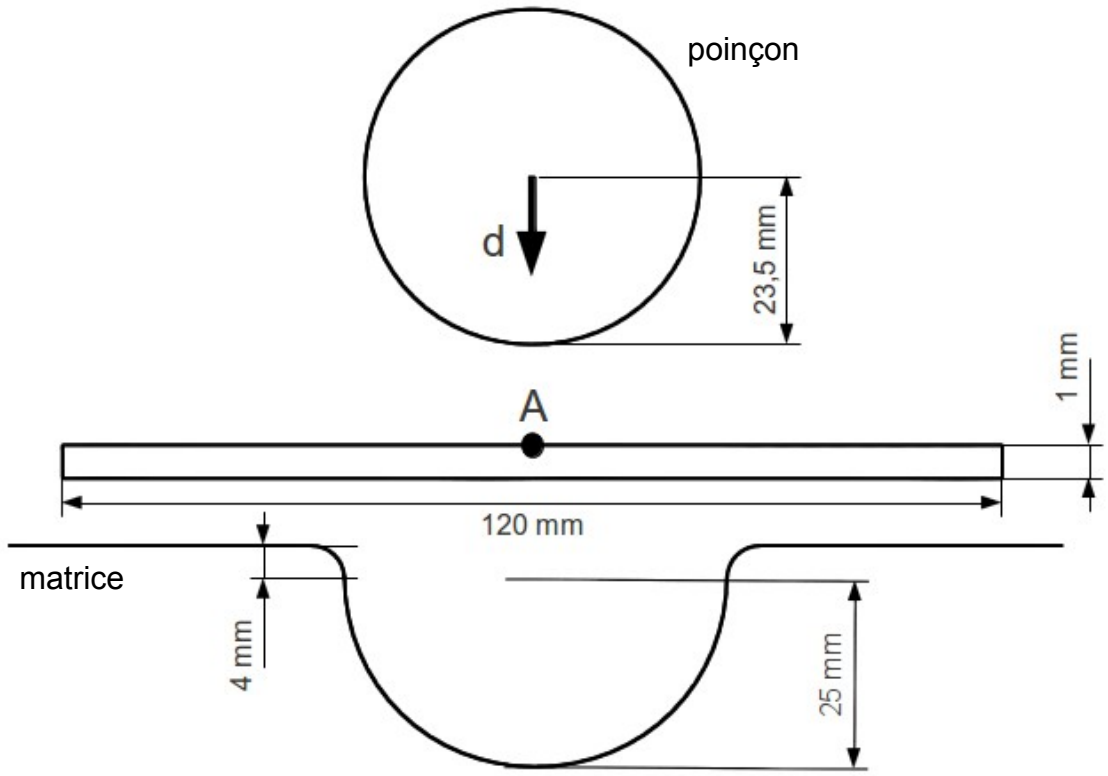


Figure 2.1.2.1-1: Géométrie du cas-test ssnp155a

W_{ext}	E_{tot}	E_{cin}	W_{liai}	W_{sch}
0	6,8808E+01	3,7883E-05	1,4873E-01	-6,8957E+01

Tableau 2.1.2.1-1 : Bilan d'énergie du cas-test ssnp155a en fin de calcul

L'explication est la suivante : le fait d'utiliser la commande AFFE_CHAR_CINE supprime de la résolution l'ensemble des degrés de liberté du poinçon. Pour calculer la contribution au travail extérieur des déplacements imposés via la commande AFFE_CHAR_CINE , on construit le vecteur des déplacements restreints aux nœuds sur lesquels un déplacement est imposé, et on utilise l'équation (1) avec comme force le vecteur des forces internes. Dans ce cas-test, le travail extérieur est uniquement celui dû au déplacement imposé du poinçon. Mais comme il n'est modélisé qu'avec des éléments de bord, qui n'ont pas de rigidité, leur contribution au vecteur des forces internes est nulle. On se trouve donc dans l'incapacité de récupérer la force qui correspond au déplacement imposé, et on obtient un travail extérieur nul.

Pour obtenir un bilan correct, il suffit d'utiliser la commande AFFE_CHAR_MECA pour imposer le déplacement. Avec celle-ci, afin de garantir le respect des conditions de déplacement imposé, des multiplicateurs de Lagrange sont construits correspondant en fait à la force à prendre en compte dans le calcul du travail extérieur. Une autre solution aurait été de mailler le poinçon afin de pouvoir y calculer les forces internes. Dans les deux cas, on aboutit alors au bilan d'énergie indiqué dans le tableau 2.1.2.1-2 ci-dessous :

W_{ext}	E_{tot}	E_{cin}	W_{liai}	W_{sch}
6,8979E+01	6,8808E+01	3,7883E-05	1,4873E-01	2,2804E-02

Tableau 2.1.2.1-2 : Bilan d'énergie avec utilisation de AFFE_CHAR_MECA

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

L'équilibre du bilan s'est nettement amélioré. Néanmoins, le terme W_{sch} reste significatif. C'est en fait dû à l'utilisation d'un schéma HHT dissipatif. Lorsqu'on utilise un schéma de Newmark non dissipatif, le terme W_{sch} devient négligeable par rapport aux autres énergies (tableau 2.1.2.1-3) :

W_{ext}	E_{tot}	E_{cin}	W_{liai}	W_{sch}
6,8947E+01	6,8872E+01	1,6589E-02	5,7774E-02	-1,4257E-08

Tableau 2.1.2.1-3 : Bilan d'énergie avec utilisation de AFFE_CHAR_MECA et d'un schéma non dissipatif

2.1.2.2 Cas-test sdlv120a

Ce cas-test, illustré sur la figure 2.1.2.2-1 , modélise un barreau élastique infini dans lequel on crée une onde de compression en imposant un déplacement à l'une de ses extrémités. L'autre extrémité du barreau est affecté d'éléments paraxiaux élastiques d'ordre 0 destinés à appliquer des conditions absorbantes à la frontière du maillage, afin de rendre compte du milieu infini.

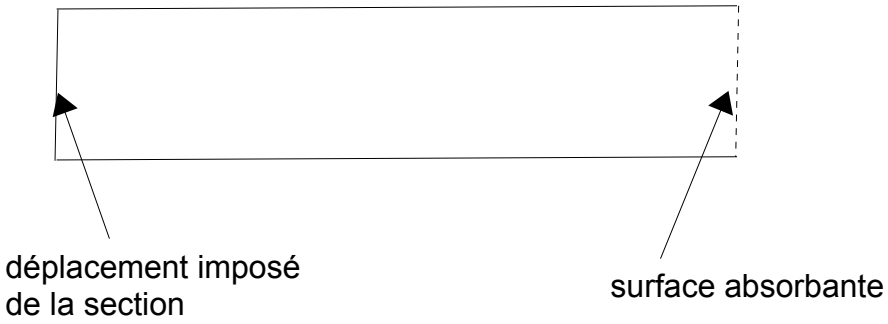


Figure 2.1.2.2-1: Géométrie du cas-test sdlv120a

On obtient alors l'évolution suivante représentée sur la figure 2.1.2.2-2 pour les différentes énergies mises en jeu :

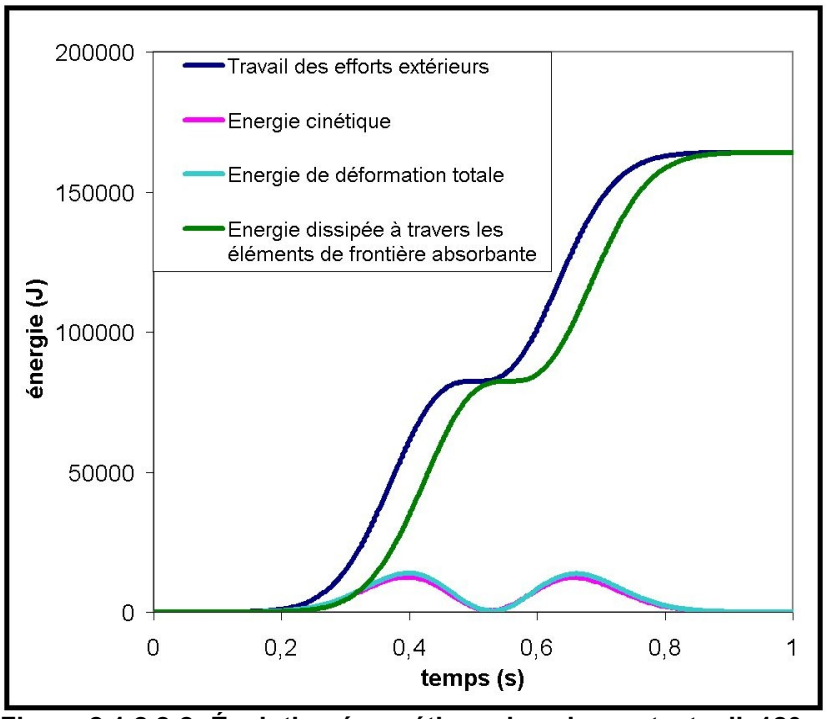


Figure 2.1.2.2-2: Évolution énergétique dans le cas-test sdlv120a

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

On observe que l'énergie apportée par l'extérieur se propage dans le barreau sous forme d'énergie de déformation totale et d'énergie cinétique avant d'être rapidement dissipée grâce aux éléments de frontière absorbante.

2.1.2.3 Cas-test wtnv109a

Ce cas-test modélise l'effet de la mécanique et de l'hydraulique sur la thermique. Un élément est étiré en lui imposant un déplacement dans la direction z, tout en lui appliquant une pression hydraulique constante, ce qui conduit à une diminution de sa température. Nous l'avons choisi pour illustrer l'influence du critère de convergence sur l'équilibre du bilan d'énergie.

Dans le tableau 2.1.2.3-1 , on présente le bilan d'énergie avec la valeur par défaut du critère RESI_GLOB_RELA , à savoir $1.E-6$, puis pour une valeur de $1.E-12$.

RESI_GLOB_RELA	W_{ext}	E_{tot}	W_{sch}
1.E-6	1,1296E+02	1,1303E+02	-7,0833E-02
1.E-12	1,1303E+02	1,1303E+02	-2,3590E-12

Tableau 2.1.2.3-1: Bilan d'énergie du cas-test wtnv109a

On constate que l'écart d'équilibre, symbolisé par la valeur de W_{sch} , a été diminué d'un facteur 10.

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