

## SSNV206 - Essai triaxial : modèles LETK et LKR

---

### Résumé

Ce test permet de valider les modèles LETK et LKR en mécanique des roches. Il s'agit d'un essai triaxial en mécanique pure ou en condition drainée. Les calculs sont effectués uniquement sur la partie solide du sol sans couplage hydromécanique. On applique un niveau de confinement de  $5 \text{ MPa}$ . Par raison de symétrie, on ne s'intéresse qu'au huitième d'un échantillon soumis à un essai triaxial. La modélisation est axisymétrique.

## 1 Description des modélisations

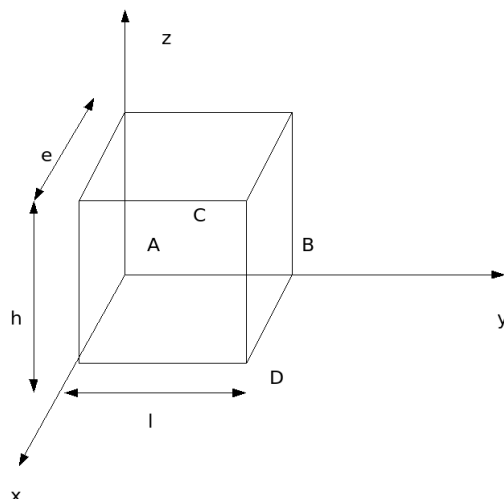
---

- Modélisation A : L'algorithme local d'intégration du modèle est explicite, classifié comme spécifique par la suite : modèle LETK.
- Modélisation B : L'algorithme local d'intégration du modèle est implicite avec la matrice jacobienne locale obtenue par perturbation : modèle LETK.
- Modélisation C : L'algorithme local d'intégration du modèle est implicite avec la matrice jacobienne locale obtenue analytiquement : modèle LETK.
- Modélisation D : L'algorithme local d'intégration du modèle est explicite, classifié comme spécifique par la suite. Le chargement est appliqué 100 fois plus lentement pour mettre en avant le rôle de la viscosité dans le modèle : modèle LETK.
- Modélisation E : L'algorithme local d'intégration du modèle est implicite avec la matrice jacobienne locale obtenue analytiquement. Le chargement est appliqué 100 fois plus lentement pour mettre en avant le rôle de la viscosité dans le modèle : modèle LETK.
- Modélisation F : L'algorithme local d'intégration du modèle est explicite, classifié comme spécifique par la suite, pas de température imposée : modèle LKR.
- Modélisation G : L'algorithme local d'intégration du modèle est implicite avec la matrice jacobienne locale obtenue par perturbation, pas de température imposée : modèle LKR .
- Modélisation H : L'algorithme local d'intégration du modèle est implicite avec la matrice jacobienne locale obtenue analytiquement, pas de température imposée, pas de couplage entre les mécanisme plastique et viscoplastique ( COUPLAGE\_P\_VP = 0. ) : modèle LKR .
- Modélisation I : L'algorithme local d'intégration du modèle est explicite, classifié comme spécifique par la suite, température croissante (0°C-100°C) imposée via AFFE\_VARC : modèle LKR .
- Modélisation J : L'algorithme local d'intégration du modèle est implicite avec la matrice jacobienne locale obtenue analytiquement , température croissante (0°C-100°C) imposée via AFFE\_VARC : modèle LKR .
- Modélisation K : L'algorithme local d'intégration du modèle est explicite, classifié comme spécifique par la suite. Le chargement est appliqué 100 fois plus lentement pour mettre en avant le rôle de la viscosité dans le modèle, pas de température imposée : modèle LKR .
- Modélisation L : L'algorithme local d'intégration du modèle est implicite avec la matrice jacobienne locale obtenue analytiquement. Le chargement est appliqué 100 fois plus lentement pour mettre en avant le rôle de la viscosité dans le modèle, pas de température imposée : modèle LKR.

Il s'agit de tests de non régression. Les 12 modélisations convergent vers des solutions concordantes pour des discrétisations fines du chargement appliqué.

## 2 Problème de référence

### 2.1 Géométrie



hauteur :  $h = 1\text{ m}$   
largeur :  $l = 1\text{ m}$   
épaisseur :  $e = 1\text{ m}$

Coordonnées des points (en mètres) :

|          | <i>A</i> | <i>B</i> | <i>C</i> | <i>D</i> |
|----------|----------|----------|----------|----------|
| <i>x</i> | 0.       | 0.       | 0.5      | 1.       |
| <i>y</i> | 0.       | 1.       | 0.5      | 1.       |
| <i>z</i> | 0.       | 0.       | 0.5      | 0.       |

## 2.2 Propriétés matériaux pour le modèle LETK

|           |           |
|-----------|-----------|
| PA        | = 0.1     |
| NELAS     | = 0.      |
| SIGMA_C   | = 12.     |
| H0_EXT    | = 1.10292 |
| GAMMA_CJS | = 0.8     |
| XAMS      | = 0.1     |
| ETA       | = 0.04    |
| A_0       | = 0.25    |
| A_E       | = 0.60    |
| A_PIC     | = 0.4     |
| S_0       | = 0.0005  |
| M_0       | = 0.01    |
| M_E       | = 2.      |
| M_PIC     | = 6.      |
| M_ULT     | = 0.61    |
| XI_ULT    | = 0.365   |
| XI_E      | = 0.028   |
| XI_PIC    | = 0.015   |
| MV_MAX    | = 3.      |
| XIV_MAX   | = 0.0039  |
| A         | = 1.5e-12 |
| N         | = 4.5     |
| SIGMA_P1  | = 57.8    |
| MU0_V     | = 0.1     |
| XI0_V     | = 0.3     |
| MU1       | = 0.1     |
| XI1       | = 0.3     |

## 2.3 Propriétés matériaux pour le modèle LKR

|               |           |   |
|---------------|-----------|---|
| PA            | = .1      |   |
| NELAS         | = 0.      |   |
| SIGMA_C       | = 12.     |   |
| BETA          | = 1.5     |   |
| GAMMA         | = .8      |   |
| V_1           | = 2.1     |   |
| V_2           | = 2.2     |   |
| A_2           | = .65     |   |
| M_0           | = .1      |   |
| M_1           | = 4.1     |   |
| Q_1           | = 45.     |   |
| XI_1          | = .017    |   |
| XI_2          | = .030    |   |
| XI_5          | = .0039   |   |
| F_P           | = .1      |   |
| A             | = 1.5e-13 |   |
| N             | = 4.5     |   |
| RHO_1         | = .1      |   |
| RHO_2         | = 2.      |   |
| RHO_4         | = .3      |   |
| R_Q           | = 0.      | (sauf pour les modélisations I et J, = 1.e-4) |
| R_M           | = 0.      | (sauf pour les modélisations I et J, = 1.e-4) |
| R_S           | = 0.      | (sauf pour les modélisations I et J, = 1.e-3) |
| R_X1          | = 0.      | (sauf pour les modélisations I et J, = 1.e-2) |
| R_X2          | = 0.      | (sauf pour les modélisations I et J, = 1.e-2) |
| R_X5          | = 0.      | (sauf pour les modélisations I et J, = 1.e-2) |
| Z             | = 0.      | (sauf pour les modélisations I et J, = 1000.) |
| COUPLAGE_P_VP | = 1.      | (sauf pour la modélisation H, = 0.)           |

## 2.4 Conditions initiales, conditions aux limites, et chargement

### Phase 1 :

On amène l'échantillon à un état homogène :  $\sigma_{xx}^0 = \sigma_{yy}^0 = \sigma_{zz}^0$ , en imposant la pression de confinement correspondante sur les faces avant, latérale droite et supérieure. Les déplacements sont bloqués sur les faces arrière ( $u_x = 0$ ), latérale gauche ( $u_y = 0$ ) et inférieure ( $u_z = 0$ ).

### Phase 2 :

On maintient les déplacements bloqués sur les faces arrière ( $u_x = 0$ ), latérale gauche ( $u_y = 0$ ) et inférieure ( $u_z = 0$ ), ainsi que la pression de confinement sur les faces avant et latérale droite. On applique un déplacement imposé sur la face supérieure :  $u_z(t)$ , de façon à obtenir une déformation  $\varepsilon_{zz} = -6$  sur une durée de 6e3 secondes pour les modélisations A, B, C, F, G, H, I et J et une durée de 6e5 secondes pour les modélisations D, E, K et L.

Pour les modélisations I et J, une température croissante est imposée dans les phases 1 et 2 via le mot-clé facteur AFFE\_VARC. On monte de 0°C à 50°C pendant la phase 1 et de 50°C à 100°C pendant la phase 2.

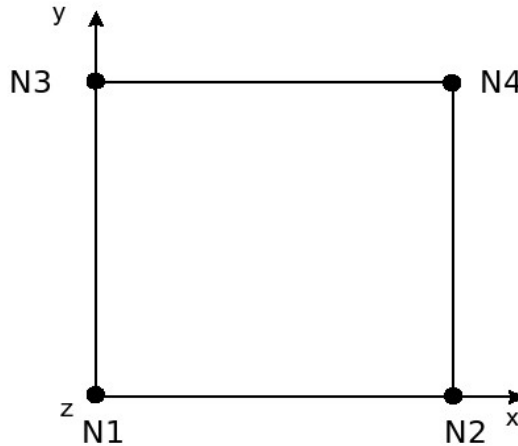
## 3 Solutions de référence

Les solutions de référence sont obtenues par discrétisation fine du chargement. Il n'existe pas a priori de solutions analytiques connues pour l'intégration des modèles LETK et LKR suivant un essai triaxial de compression.

## 4 Modélisation A

### 4.1 Caractéristique de la modélisation

AXIS :



Découpage : 1 en hauteur, 1 en largeur.

### 4.2 Caractéristique du maillage

Nombre de nœuds : 4  
Nombre de mailles et types : 1 QUAD4 et 4 SEG2

### 4.3 Grandeurs testées et résultats

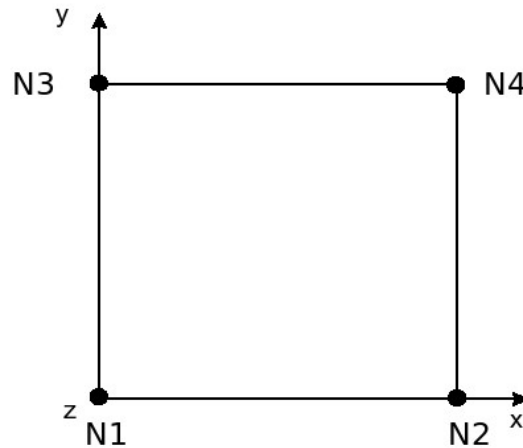
Les valeurs sont testées en non régression à une tolérance donnée de 0,1% .

| Localisation    | Instant | Contrainte (MPa) | Aster      |
|-----------------|---------|------------------|------------|
| Point <i>N4</i> | 7000.   | $\sigma_{yy}$    | - 5.000    |
|                 | 13000.  | $\sigma_{yy}$    | - 11.941   |
| Localisation    | Instant | Déplacement (m)  | Aster      |
| Point <i>N4</i> | 7000.   | <i>DX</i>        | -7.6 10-4  |
|                 | 13000.  | <i>DX</i>        | 3.020 10-2 |

## 5 Modélisation B

### 5.1 Caractéristique de la modélisation

AXIS :



Découpage : 1 en hauteur, 1 en largeur.

### 5.2 Caractéristique du maillage

Nombre de nœuds : 4

Nombre de mailles et types : 1 QUAD4 et 4 SEG2

### 5.3 Grandeurs testées et résultats

Les valeurs sont testées en non régression à une tolérance donnée de 0,1% .

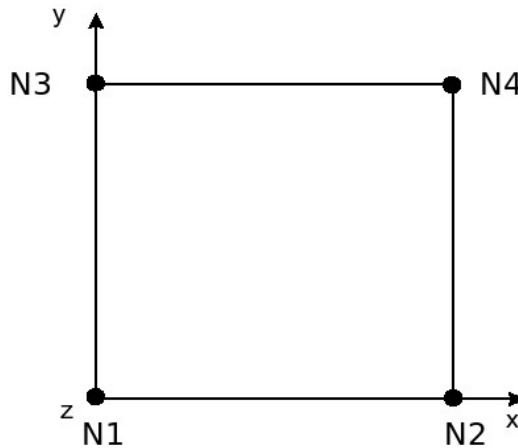
| Localisation    | Instant | Contrainte (MPa) | Aster      |
|-----------------|---------|------------------|------------|
| Point <i>N4</i> | 7000.   | $\sigma_{yy}$    | - 5.000    |
|                 | 13000.  | $\sigma_{yy}$    | - 11.945   |
| Localisation    | Instant | Déplacement (m)  | Aster      |
| Point <i>N4</i> | 7000.   | <i>DX</i>        | -7.6 10-4  |
|                 | 13000.  | <i>DX</i>        | 3.026 10-2 |



## 6 Modélisation C

### 6.1 Caractéristique de la modélisation

AXIS :



Découpage : 1 en hauteur, 1 en largeur.

### 6.2 Caractéristique du maillage

Nombre de nœuds : 4

Nombre de mailles et types : 1 QUAD4 et 4 SEG2

### 6.3 Grandeurs testées et résultats

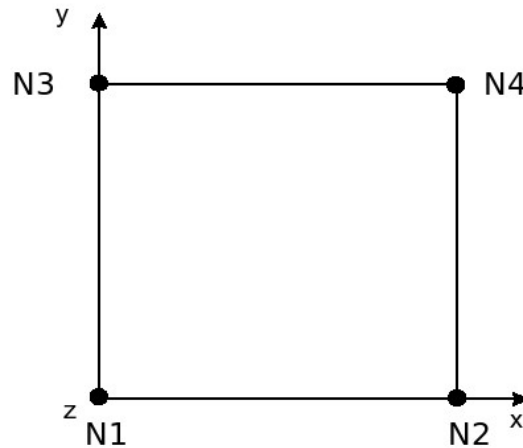
Les valeurs sont testées en non régression à une tolérance donnée de 0,1% .

| Localisation    | Instant | Contrainte (MPa) | Aster      |
|-----------------|---------|------------------|------------|
| Point <i>N4</i> | 7000.   | $\sigma_{yy}$    | - 5.000    |
|                 | 13000.  | $\sigma_{yy}$    | - 11.945   |
| Localisation    | Instant | Déplacement (m)  | Aster      |
| Point <i>N4</i> | 7000.   | <i>DX</i>        | -7.6 10-4  |
|                 | 13000.  | <i>DX</i>        | 3.026 10-2 |

## 7 Modélisation D

### 7.1 Caractéristique de la modélisation

AXIS :



Découpage : 1 en hauteur, 1 en largeur.

### 7.2 Caractéristique du maillage

Nombre de nœuds : 4

Nombre de mailles et types : 1 QUAD4 et 4 SEG2

### 7.3 Grandeurs testées et résultats

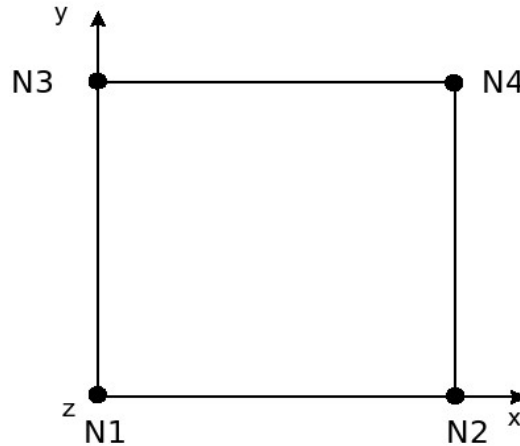
Les valeurs sont testées en non régression à une tolérance donnée de 0,1% .

| Localisation    | Instant | Contrainte (MPa) | Aster     |
|-----------------|---------|------------------|-----------|
| Point <i>N4</i> | 7000.   | $\sigma_{yy}$    | - 5.000   |
|                 | 13000.  | $\sigma_{yy}$    | - 12.01   |
| Localisation    | Instant | Déplacement (m)  | Aster     |
| Point <i>N4</i> | 7000.   | <i>DX</i>        | -7.6 10-4 |
|                 | 13000.  | <i>DX</i>        | 2.98 10-2 |

## 8 Modélisation E

### 8.1 Caractéristique de la modélisation

AXIS :



Découpage : 1 en hauteur, 1 en largeur.

### 8.2 Caractéristique du maillage

Nombre de nœuds : 4  
Nombre de mailles et types : 1 QUAD4 et 4 SEG2

### 8.3 Grandeurs testées et résultats

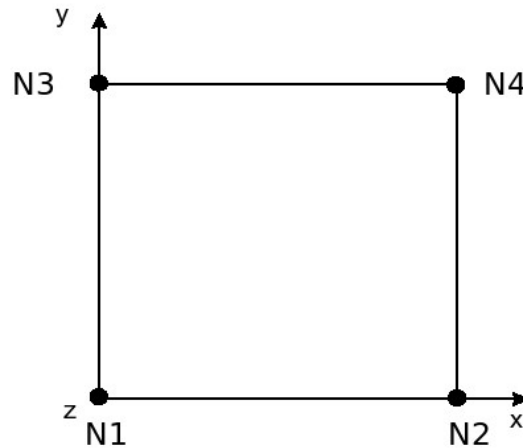
Les valeurs sont testées en non régression à une tolérance donnée de 0,1% .

| Localisation | Instant | Contrainte (MPa) | Aster     |
|--------------|---------|------------------|-----------|
| Point N 4    | 7000.   | $\sigma_{yy}$    | - 5.000   |
|              | 13000.  | $\sigma_{yy}$    | - 12.01   |
| Localisation | Instant | Déplacement (m)  | Aster     |
| Point N 4    | 7000.   | $DX$             | -7.6 10-4 |
|              | 13000.  | $DX$             | 3.00 10-2 |

## 9 Modélisation F

### 9.1 Caractéristique de la modélisation

AXIS :



Découpage : 1 en hauteur, 1 en largeur.

### 9.2 Caractéristique du maillage

Nombre de nœuds : 4

Nombre de mailles et types : 1 QUAD4 et 4 SEG2

### 9.3 Grandeurs testées et résultats

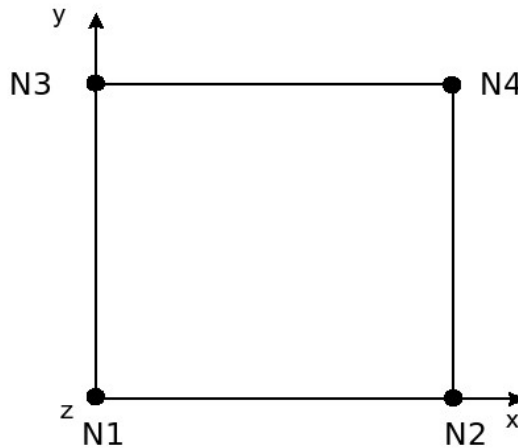
Les valeurs sont testées en non régression à une tolérance donnée de 0,1% .

| Localisation | Instant | Contrainte (MPa) | Aster     |
|--------------|---------|------------------|-----------|
| Point N4     | 7000.   | $\sigma_{yy}$    | - 5.000   |
|              | 13000.  | $\sigma_{yy}$    | -11.47    |
| Localisation | Instant | Déplacement (m)  | Aster     |
| Point N4     | 7000.   | $DX$             | -7.6 10-4 |
|              | 13000.  | $DX$             | 2.91 10-2 |

## 10 Modélisation G

### 10.1 Caractéristique de la modélisation

AXIS :



Découpage : 1 en hauteur, 1 en largeur.

### 10.2 Caractéristique du maillage

Nombre de nœuds : 4  
Nombre de mailles et types : 1 QUAD4 et 4 SEG2

### 10.3 Grandeurs testées et résultats

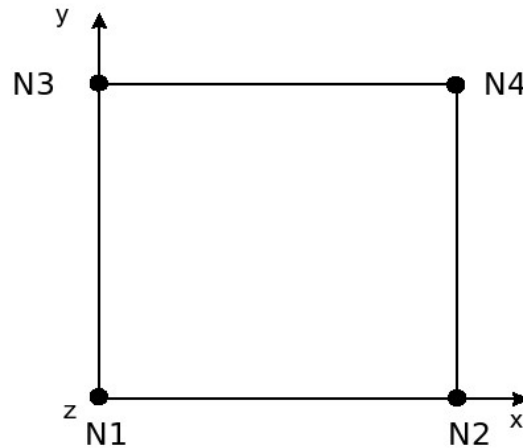
Les valeurs sont testées en non régression à une tolérance donnée de 0,1% .

| Localisation | Instant | Contrainte (MPa) | Aster     |
|--------------|---------|------------------|-----------|
| Point N4     | 7000.   | $\sigma_{yy}$    | - 5.000   |
|              | 13000.  | $\sigma_{yy}$    | -11.47    |
| Localisation | Instant | Déplacement (m)  | Aster     |
| Point N4     | 7000.   | $DX$             | -7.6 10-4 |
|              | 13000.  | $DX$             | 2.92 10-2 |

## 11 Modélisation H

### 11.1 Caractéristique de la modélisation

AXIS :



Découpage : 1 en hauteur, 1 en largeur.

### 11.2 Caractéristique du maillage

Nombre de nœuds : 4

Nombre de mailles et types : 1 QUAD4 et 4 SEG2

### 11.3 Grandeurs testées et résultats

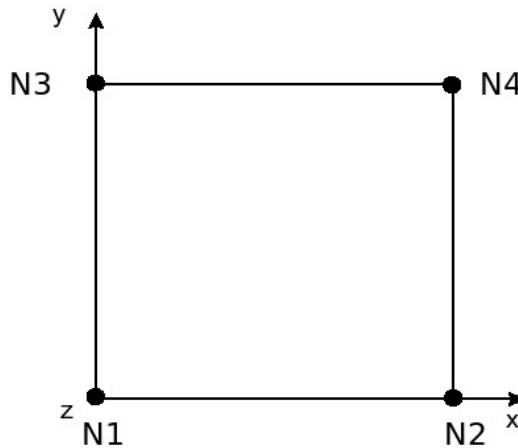
Les valeurs sont testées en non régression à une tolérance donnée de 0,1% .

| Localisation | Instant | Contrainte (MPa) | Aster     |
|--------------|---------|------------------|-----------|
| Point N4     | 7000.   | $\sigma_{yy}$    | - 5.000   |
|              | 13000.  | $\sigma_{yy}$    | -14.02    |
| Localisation | Instant | Déplacement (m)  | Aster     |
| Point N4     | 7000.   | $DX$             | -7.6 10-4 |
|              | 13000.  | $DX$             | 2.90 10-2 |

## 12 Modélisation I

### 12.1 Caractéristique de la modélisation

AXIS :



Découpage : 1 en hauteur, 1 en largeur.

### 12.2 Caractéristique du maillage

Nombre de nœuds : 4  
Nombre de mailles et types : 1 QUAD4 et 4 SEG2

### 12.3 Grandeurs testées et résultats

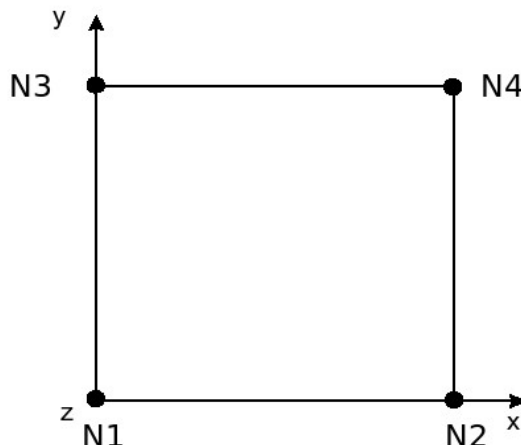
Les valeurs sont testées en non régression à une tolérance donnée de 0,1% .

| Localisation | Instant | Contrainte (MPa) | Aster     |
|--------------|---------|------------------|-----------|
| Point N 4    | 7000.   | $\sigma_{yy}$    | - 5.000   |
|              | 13000.  | $\sigma_{yy}$    | -14.19    |
| Localisation | Instant | Déplacement (m)  | Aster     |
| Point N 4    | 7000.   | $DX$             | -7.6 10-4 |
|              | 13000.  | $DX$             | 2.85 10-2 |

## 13 Modélisation J

### 13.1 Caractéristique de la modélisation

AXIS :



Découpage : 1 en hauteur, 1 en largeur.

### 13.2 Caractéristique du maillage

Nombre de nœuds : 4

Nombre de mailles et types : 1 QUAD4 et 4 SEG2

### 13.3 Grandeurs testées et résultats

Les valeurs sont testées en non régression à une tolérance donnée de 0,1% .

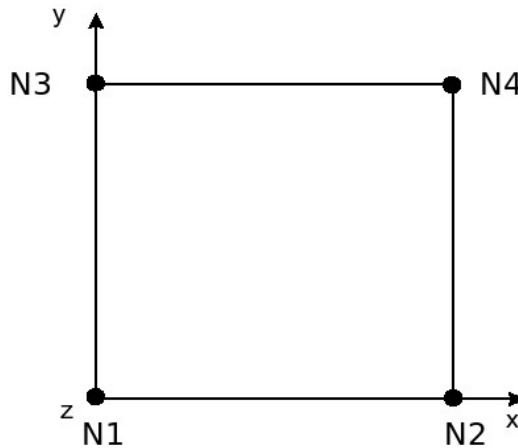
| Localisation | Instant | Contrainte (MPa) | Aster     |
|--------------|---------|------------------|-----------|
| Point N4     | 7000.   | $\sigma_{yy}$    | - 5.000   |
|              | 13000.  | $\sigma_{yy}$    | -14.19    |
| Localisation | Instant | Déplacement (m)  | Aster     |
| Point N4     | 7000.   | $DX$             | -7.6 10-4 |
|              | 13000.  | $DX$             | 2.85 10-2 |



## 14 Modélisation K

### 14.1 Caractéristique de la modélisation

AXIS :



Découpage : 1 en hauteur, 1 en largeur.

### 14.2 Caractéristique du maillage

Nombre de nœuds : 4  
Nombre de mailles et types : 1 QUAD4 et 4 SEG2

### 14.3 Grandeurs testées et résultats

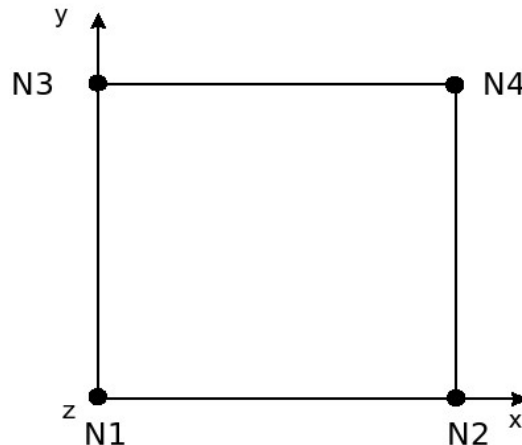
Les valeurs sont testées en non régression à une tolérance donnée de 0,1% .

| Localisation | Instant | Contrainte (MPa) | Aster     |
|--------------|---------|------------------|-----------|
| Point N 4    | 7000.   | $\sigma_{yy}$    | - 5.000   |
|              | 13000.  | $\sigma_{yy}$    | -11.53    |
| Localisation | Instant | Déplacement (m)  | Aster     |
| Point N 4    | 7000.   | $DX$             | -7.6 10-4 |
|              | 13000.  | $DX$             | 2.89 10-2 |

## 15 Modélisation L

### 15.1 Caractéristique de la modélisation

AXIS :



Découpage : 1 en hauteur, 1 en largeur.

### 15.2 Caractéristique du maillage

Nombre de nœuds : 4

Nombre de mailles et types : 1 QUAD4 et 4 SEG2

### 15.3 Grandeurs testées et résultats

Les valeurs sont testées en non régression à une tolérance donnée de 0,1% .

| Localisation | Instant | Contrainte (MPa) | Aster     |
|--------------|---------|------------------|-----------|
| Point N4     | 7000.   | $\sigma_{yy}$    | - 5.000   |
|              | 13000.  | $\sigma_{yy}$    | -11.53    |
| Localisation | Instant | Déplacement (m)  | Aster     |
| Point N4     | 7000.   | $DX$             | -7.6 10-4 |
|              | 13000.  | $DX$             | 2.90 10-2 |

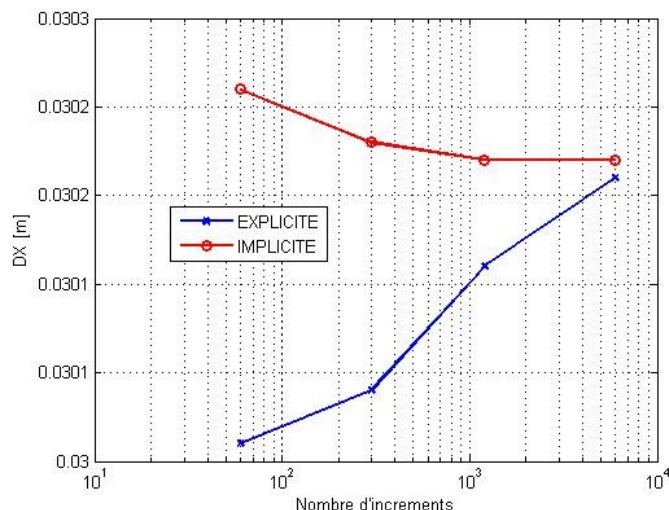
## 16 Synthèse des résultats

Il s'agit de tests de non régression développés pour valider le modèle LETK en mécanique pure. La comparaison entre les deux schémas d'intégration permet d'identifier certaines tendances sur les profils de convergence.

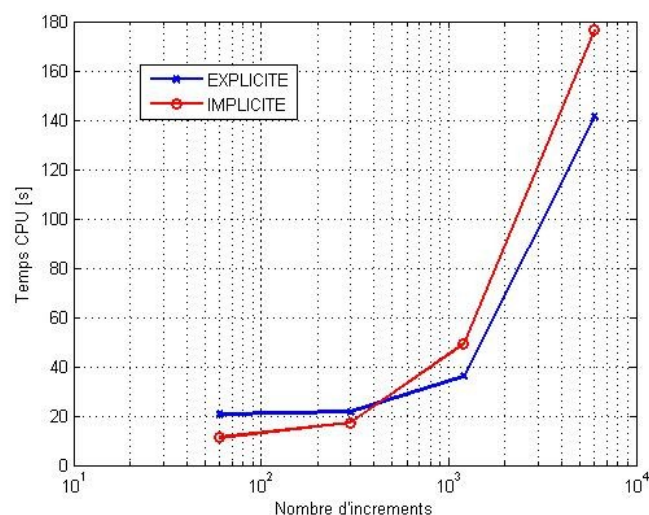
Un schéma d'intégration explicite permet pour une discrétisation fine du chargement de garantir des résultats convergés et un temps d'exécution machine moindre que le schéma implicite. Il est en revanche difficile de quantifier le niveau de finesse du chargement à appliquer pour garantir la convergence des études avec un schéma d'intégration explicite.

Le schéma d'intégration implicite garantit un niveau de précision supérieur au schéma explicite pour la même discrétisation de chargement. Il permet également de disposer d'un opérateur tangent local consistant. Ces avantages assurent ainsi sur une large gamme de discrétisations du chargement une convergence sur les résultats obtenus avec le schéma implicite.

Les figures suivantes illustrent l'argumentaire précédent.



**Illustration 1: Déplacement latéral maximal de l'échantillon de laboratoire au cours d'un essai triaxial de compression en fonction du niveau de discrétisation du chargement**



**Illustration 2: Temps CPU cumulé pour l'essai triaxial de compression en fonction du niveau de discrétisation du chargement**

