

SSND102 – Loi de comportement cinématique non-linéaire pour des éléments discrets

Résumé :

Le problème est quasi-statique non-linéaire en mécanique des structures. Il s'agit d'une loi avec écrouissage cinématique non-linéaire. On analyse la réponse d'éléments discrets supportant une loi de comportement cinématique non-linéaire sous un chargement cyclique.

Les éléments discrets testés sont :

- [1] 3D (K_T_D_L, K_TR_D_L, K_T_D_N, K_TR_D_N);
- [2] 2D (K_T_D_L, K_TR_D_L, K_T_D_N, K_TR_D_N).

Tous les degrés de liberté sont testés, les paramètres du chargement en déplacements et ceux de la loi cinématique sont différents pour tous les degrés de liberté de façon à couvrir différentes situations. Les solutions de référence sont obtenues de façon analytique ou par comparaison avec une application extérieure.

1 Problème de référence

1.1 Géométrie

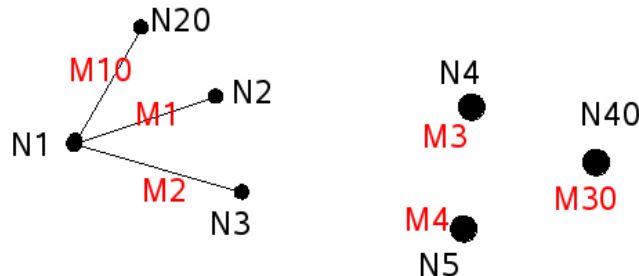


Figure 1.1.a : géométrie.

	Modèle en 3D	Modèle en 2D	GROUP_MA
Maille <i>M1</i> : Nœud <i>N1</i> à <i>N2</i>	DIS_T	2D_DIS_T	DL_T
Maille <i>M2</i> : Nœud <i>N1</i> à <i>N3</i>	DIS_TR	2D_DIS_TR	DL_TR
Maille <i>M3</i> : Nœud <i>N4</i>	DIS_T	2D_DIS_T	DN_T
Maille <i>M4</i> : Nœud <i>N5</i>	DIS_TR	2D_DIS_TR	DN_TR
Maille <i>M10</i> : Nœud <i>N1</i> à <i>N20</i>	DIS_T		DL_T0
Maille <i>M30</i> : Nœud <i>N40</i>	DIS_T		DN_T0

1.2 Propriétés du matériau

La loi de comportement s'écrit sous la forme générique suivante (pour chaque degré de liberté) :

la relation élastoplastique : $F = K_e (U - U^{an})$

la surface limite : $f = |F - X| - F_y$

la partie écrouissage cinématique :

$$X = \frac{k_x \cdot \alpha}{\left[1 + \left[\frac{k_x \cdot \alpha}{F_u} \right]^n \right]^{1/n}}$$

Elle nécessite donc 5 caractéristiques. Leurs unités doivent être en accord avec celles de l'étude.

K_e : raideur élastique

F_y : limite élastique

k_x : raideur cinématique

F_u : effort limite cinématique

n : puissance

1.3 Conditions aux limites et chargements

Nœud *N1* : encastrement

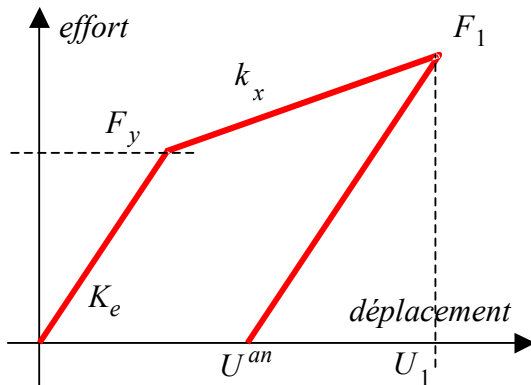
Nœuds *N2*, *N3*, *N4*, *N5*, *N20*, *N40* : pour tous les degrés de liberté le signal est cyclique à déplacement imposé.

2 Solution de référence

2.1 Méthode de calcul utilisée pour la solution de référence

Dans le cas général, la forme complexe de la loi ne permet pas de calculer une solution de référence.

Pour valider la loi, on se place dans le cas d'un écouissage cinématique linéaire (la puissance et l'effort limite cinématique ne sont pas donnés). Les efforts ainsi que l'énergie dissipée peuvent être calculés analytiquement.



Les données sont : F_y , K_e , k_x et l'amplitude du déplacement : $U_1 = 5 \cdot \frac{F_y}{K_e}$

Ce qui donne :

$$F_1 = F_y + 4 \cdot k_x \frac{F_y}{K_e}$$

$$U_{an} = 4 \cdot \frac{F_y}{K_e^2} (K_e - k_x)$$

$$\text{L'énergie dissipée est : } W_1 = U_{an} \cdot \frac{(F_y + F_1)}{2}$$

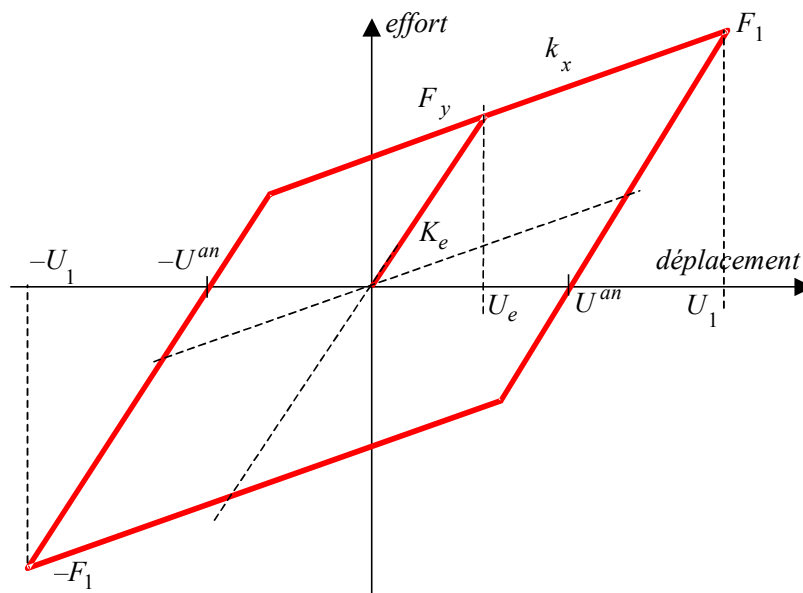


Figure 2.1.a : cycle de chargement.

Pour un cycle stabilisé (déplacement allant de 0 à U_1 à $-U_1$ à U_e) l'énergie dissipée est $\bar{W}_d = 4 \cdot U_{an} \cdot F_y$.

Dans le cas général de la loi puissance, un programme extérieur a permis de valider les réponses en efforts.

2.2 Résultats de référence

Les tests sont réalisés sur :

- 1) l'effort à chaque inversion de chargement ;
- 2) l'énergie dissipée en fin de chargement.

Pour les deux modélisations un tableau présente les paramètres de la loi ainsi que les valeurs des efforts et de l'énergie dissipée en fin de cycle.

2.3 Incertitude sur la solution

Pour le cas de l'écrouissage cinématique linéaire il n'y a aucune incertitude, la solution est analytique, aussi bien pour les efforts que pour l'énergie.

Pour le cas de l'écrouissage non linéaire la solution de référence est donnée par un programme extérieur.

3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques de la modélisation

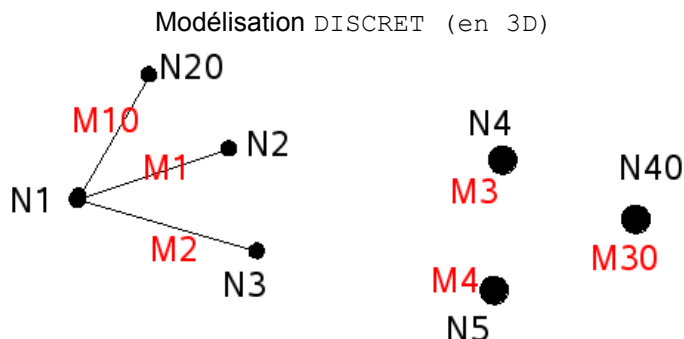


Figure 3.1.a : géométrie.

Caractéristiques des éléments discrets

Maille *M1* : Nœud *N1* à *N2*
 Maille *M2* : Nœud *N1* à *N3*
 Maille *M3* : Nœud *N4*
 Maille *M4* : Nœud *N5*
 Maille *M10* : Nœud *N1* à *N20*
 Maille *M30* : Nœud *N40*

Modélisation en 3D

	GROUP_MA
DIS_T	DL_T
DIS_TR	DL_TR
DIS_T	DN_T
DIS_TR	DN_TR
DIS_T	DL_T0
DIS_T	DN_T0

Le discret *DL_T0* a les mêmes caractéristiques que *DL_T*, par contre son orientation est différente.

CARA = 'ANGL_NAUT', VALE = (90.0, -90.0, 0.0)

L'effort *N* est donc suivant l'axe *Z*, l'effort *VY* suivant l'axe *Z* et l'effort *VZ* suivant *X*.

3.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 7, Nombre de mailles : 6, Éléments SEG2 : 3, Éléments POI1 : 3

3.3 Définition de la fonction de chargement

instants	valeurs
0.0	0.000
30.0	1.000
90.0	-1.000
145.0	0.800
180.0	-0.450
230.0	1.150
250.0	0.500
280.0	1.450

Le pas choisi est de 1. s.

3.4 Propriétés des discrets

Le tableau ci-dessous donne pour toutes les directions sollicitées les caractéristiques des discrets.

		$F_{y \text{ LIMY_}^*}$	$K_{e \text{ K_T}^*}$	$F_{u \text{ LIMU_}^*}$	$k_{x \text{ KCIN_}^*}$	$n \text{ PUIS_}^*$
DL T	dx	1000.0	3400000.0	1000.0	700000.0	2.00
DL T0	dy	1500.0	2000000.0	800.0	900000.0	1.50
	dz	2000.0	2500000.0	800.0	700000.0	2.25
DN T	dx	1000.0	3400000.0	1000.0	700000.0	2.00
	dy	1500.0	2000000.0	800.0	900000.0	1.50
	dz	2000.0	2500000.0	800.0	700000.0	2.25
DL TR	dx	1000.0	3400000.0	1000.0	700000.0	2.00
	dy	1500.0	2000000.0	800.0	900000.0	1.50
	dz	2000.0	2500000.0	800.0	700000.0	2.25
	rx	3000.0	3000000.0	1000.0	600000.0	2.00
	ry	3500.0	2700000.0	1800.0	800000.0	1.50
	rz	2500.0	3200000.0	1400.0	850000.0	2.25
DN TR	dx	1000.0	3400000.0	1000.0	700000.0	2.00
	dy	1500.0	2000000.0	800.0	900000.0	1.50
	dz	2000.0	2500000.0	800.0	700000.0	2.25
	rx	3000.0	3000000.0	1000.0	600000.0	2.00
	ry	3500.0	2700000.0	1800.0	800000.0	1.50
	rz	2500.0	3200000.0	1400.0	850000.0	2.25
DN T0	dx	1000.0	3400000.0		700000.0	
	dy	1500.0	2000000.0		900000.0	
	dz	2000.0	2500000.0		700000.0	

3.5 Grandeurs testées et résultats

GROUP_MA	Effort	Instant	Effort Référence	Effort Code_Aster	Erreur
DN TR	N	30.000	1635.707253	1635.707253	-8.4900e-11
DN TR	N	90.000	-1635.707253	-1635.707253	-8.4900e-11
DN TR	N	145.000	1525.492881	1525.492881	-1.8200e-10
DN TR	N	180.000	-1249.231871	-1249.231871	1.4500e-11
DN TR	N	230.000	1699.177353	1699.177353	-1.6000e-10
DN TR	N	250.000	-415.381013	-415.381013	-1.1200e-10
DN TR	N	280.000	1789.595108	1789.595108	-4.9600e-11
DN TR	VY	30.000	2224.098875	2224.098875	-4.9400e-12
DN TR	VY	90.000	-2224.098875	-2224.098875	-4.9400e-12
DN TR	VY	145.000	2190.040518	2190.040518	-1.0900e-10
DN TR	VY	180.000	-2017.290415	-2017.290415	-1.5500e-10
DN TR	VY	230.000	2239.745512	2239.745512	-6.2600e-12
DN TR	VY	250.000	-790.397664	-790.397663	-3.5800e-11
DN TR	VY	280.000	2258.782745	2258.782745	1.0400e-10
DN TR	VZ	30.000	2767.252580	2767.252580	-7.5200e-11
DN TR	VZ	90.000	-2767.252580	-2767.252580	-7.5200e-11
DN TR	VZ	145.000	2740.932239	2740.932239	1.8200e-10
DN TR	VZ	180.000	-2547.183658	-2547.183658	2.5800e-11
DN TR	VZ	230.000	2777.276300	2777.276300	-1.5700e-10
DN TR	VZ	250.000	-1243.236082	-1243.236082	-9.2100e-11
DN TR	VZ	280.000	2787.481342	2787.481342	7.7000e-11
DN TR	MFY	30.000	5022.231028	5022.231028	9.6800e-11
DN TR	MFY	90.000	-5022.231028	-5022.231028	9.6800e-11
DN TR	MFY	145.000	4911.499221	4911.499221	8.9600e-11
DN TR	MFY	180.000	-4443.221450	-4443.221450	-4.3200e-12
DN TR	MFY	230.000	5075.752629	5075.752629	3.5200e-12
DN TR	MFY	250.000	-2025.828992	-2025.828992	-8.7200e-11
DN TR	MFY	280.000	5143.339483	5143.339483	-4.7600e-11
DN TR	MFZ	30.000	3773.863680	3773.863680	4.0200e-11
DN TR	MFZ	90.000	-3773.863680	-3773.863680	4.0200e-11
DN TR	MFZ	145.000	3686.099695	3686.099695	-2.8500e-11
DN TR	MFZ	180.000	-3236.583886	-3236.583886	1.3700e-10
DN TR	MFZ	230.000	3810.233618	3810.233618	6.2600e-11
DN TR	MFZ	250.000	-1262.367026	-1262.367026	5.6200e-11
DN TR	MFZ	280.000	3849.201624	3849.201624	-1.8600e-12

GROUP_MA	Effort	Instant	Effort Référence	Effort Code_Aster	Erreur
DN T	N	30.000	1635.707253	1635.707253	-8.4900e-11
DN T	N	90.000	-1635.707253	-1635.707253	-8.4900e-11
DN T	N	145.000	1525.492881	1525.492881	-1.8200e-10
DN T	N	180.000	-1249.231871	-1249.231871	1.4500e-11
DN T	N	230.000	1699.177353	1699.177353	-1.6000e-10
DN T	N	250.000	-415.381013	-415.381013	-1.1200e-10
DN T	N	280.000	1789.595108	1789.595108	-4.9600e-11
DN T	VY	30.000	2224.098875	2224.098875	-4.9400e-12
DN T	VY	90.000	-2224.098875	-2224.098875	-4.9400e-12
DN T	VY	145.000	2190.040518	2190.040518	-1.0900e-10
DN T	VY	180.000	-2017.290415	-2017.290415	-1.5500e-10
DN T	VY	230.000	2239.745512	2239.745512	-6.2600e-12
DN T	VY	250.000	-790.397664	-790.397663	-3.5800e-11
DN T	VY	280.000	2258.782745	2258.782745	1.0400e-10

DN T	VZ	30.000	2767.252580	2767.252580	-7.5200e-11
DN T	VZ	90.000	-2767.252580	-2767.252580	-7.5200e-11
DN T	VZ	145.000	2740.932239	2740.932239	1.8200e-10
DN T	VZ	180.000	-2547.183658	-2547.183658	2.5800e-11
DN T	VZ	230.000	2777.276300	2777.276300	-1.5700e-10
DN T	VZ	250.000	-1243.236082	-1243.236082	-9.2100e-11
DN T	VZ	280.000	2787.481342	2787.481342	7.7000e-11

GROUP_MA	Effort	Instant	Effort Référence	Effort Code_Aster	Erreur
DL TR	N	30.000	1635.707253	1635.707253	-8.4900e-11
DL TR	N	90.000	-1635.707253	-1635.707253	-8.4900e-11
DL TR	N	145.000	1525.492881	1525.492881	-1.8200e-10
DL TR	N	180.000	-1249.231871	-1249.231871	1.4500e-11
DL TR	N	230.000	1699.177353	1699.177353	-1.6000e-10
DL TR	N	250.000	-415.381013	-415.381013	-1.1200e-10
DL TR	N	280.000	1789.595108	1789.595108	-4.9600e-11
DL TR	VY	30.000	2224.098875	2224.098875	-4.9400e-12
DL TR	VY	90.000	-2224.098875	-2224.098875	-4.9400e-12
DL TR	VY	145.000	2190.040518	2190.040518	-1.0900e-10
DL TR	VY	180.000	-2017.290415	-2017.290415	-1.5500e-10
DL TR	VY	230.000	2239.745512	2239.745512	-6.2600e-12
DL TR	VY	250.000	-790.397664	-790.397663	-3.5800e-11
DL TR	VY	280.000	2258.782745	2258.782745	1.0400e-10
DL TR	VZ	30.000	2767.252580	2767.252580	-7.5200e-11
DL TR	VZ	90.000	-2767.252580	-2767.252580	-7.5200e-11
DL TR	VZ	145.000	2740.932239	2740.932239	1.8200e-10
DL TR	VZ	180.000	-2547.183658	-2547.183658	2.5800e-11
DL TR	VZ	230.000	2777.276300	2777.276300	-1.5700e-10
DL TR	VZ	250.000	-1243.236082	-1243.236082	-9.2100e-11
DL TR	VZ	280.000	2787.481342	2787.481342	7.7000e-11
DL TR	MFY	30.000	5022.231028	5022.231028	9.6800e-11
DL TR	MFY	90.000	-5022.231028	-5022.231028	9.6800e-11
DL TR	MFY	145.000	4911.499221	4911.499221	8.9600e-11
DL TR	MFY	180.000	-4443.221450	-4443.221450	-4.3200e-12
DL TR	MFY	230.000	5075.752629	5075.752629	3.5200e-12
DL TR	MFY	250.000	-2025.828992	-2025.828992	-8.7200e-11
DL TR	MFY	280.000	5143.339483	5143.339483	-4.7600e-11
DL TR	MFZ	30.000	3773.863680	3773.863680	4.0200e-11
DL TR	MFZ	90.000	-3773.863680	-3773.863680	4.0200e-11
DL TR	MFZ	145.000	3686.099695	3686.099695	-2.8500e-11
DL TR	MFZ	180.000	-3236.583886	-3236.583886	1.3700e-10
DL TR	MFZ	230.000	3810.233618	3810.233618	6.2600e-11
DL TR	MFZ	250.000	-1262.367026	-1262.367026	5.6200e-11
DL TR	MFZ	280.000	3849.201624	3849.201624	-1.8600e-12

GROUP_MA	Effort	Instant	Effort Référence	Effort Code_Aster	Erreur
DL_T	N	30.000	1635.707253	1635.707253	-8.4900e-11
DL_T	N	90.000	-1635.707253	-1635.707253	-8.4900e-11
DL_T	N	145.000	1525.492881	1525.492881	-1.8200e-10
DL_T	N	180.000	-1249.231871	-1249.231871	1.4500e-11
DL_T	N	230.000	1699.177353	1699.177353	-1.6000e-10
DL_T	N	250.000	-415.381013	-415.381013	-1.1200e-10
DL_T	N	280.000	1789.595108	1789.595108	-4.9600e-11

DL T	VY	30.000	2224.098875	2224.098875	-4.9400e-12
DL T	VY	90.000	-2224.098875	-2224.098875	-4.9400e-12
DL T	VY	145.000	2190.040518	2190.040518	-1.0900e-10
DL T	VY	180.000	-2017.290415	-2017.290415	-1.5500e-10
DL T	VY	230.000	2239.745512	2239.745512	-6.2600e-12
DL T	VY	250.000	-790.397664	-790.397663	-3.5800e-11
DL T	VY	280.000	2258.782745	2258.782745	1.0400e-10
DL T	VZ	30.000	2767.252580	2767.252580	-7.5200e-11
DL T	VZ	90.000	-2767.252580	-2767.252580	-7.5200e-11
DL T	VZ	145.000	2740.932239	2740.932239	1.8200e-10
DL T	VZ	180.000	-2547.183658	-2547.183658	2.5800e-11
DL T	VZ	230.000	2777.276300	2777.276300	-1.5700e-10
DL T	VZ	250.000	-1243.236082	-1243.236082	-9.2100e-11
DL T	VZ	280.000	2787.481342	2787.481342	7.7000e-11

GROUP_MA	Effort	Instant	Effort Référence	Effort Code_Aster	Erreur
DL T0	N	30.000	1635.707253	1635.707253	-8.4900e-11
DL T0	N	90.000	-1635.707253	-1635.707253	-8.4900e-11
DL T0	N	145.000	1525.492881	1525.492881	-1.8200e-10
DL T0	N	180.000	-1249.231871	-1249.231871	1.4500e-11
DL T0	N	230.000	1699.177353	1699.177353	-1.6000e-10
DL T0	N	250.000	-415.381013	-415.381013	-1.1200e-10
DL T0	N	280.000	1789.595108	1789.595108	-4.9600e-11
DL T0	VY	30.000	2224.098875	2224.098875	-4.9400e-12
DL T0	VY	90.000	-2224.098875	-2224.098875	-4.9400e-12
DL T0	VY	145.000	2190.040518	2190.040518	-1.0900e-10
DL T0	VY	180.000	-2017.290415	-2017.290415	-1.5500e-10
DL T0	VY	230.000	2239.745512	2239.745512	-6.2600e-12
DL T0	VY	250.000	-790.397664	-790.397663	-3.5800e-11
DL T0	VY	280.000	2258.782745	2258.782745	1.0400e-10
DL T0	VZ	30.000	2767.252580	2767.252580	-7.5200e-11
DL T0	VZ	90.000	-2767.252580	-2767.252580	-7.5200e-11
DL T0	VZ	145.000	2740.932239	2740.932239	1.8200e-10
DL T0	VZ	180.000	-2547.183658	-2547.183658	2.5800e-11
DL T0	VZ	230.000	2777.276300	2777.276300	-1.5700e-10
DL T0	VZ	250.000	-1243.236082	-1243.236082	-9.2100e-11
DL T0	VZ	280.000	2787.481342	2787.481342	7.7000e-11

GROUP_MA	Effort	Instant	Effort Référence	Effort Code_Aster	Erreur
DN T0	N	30.000	1823.529412	1823.529412	3.5500e-11
DN T0	N	90.000	-1823.529412	-1823.529412	3.5500e-11
DN T0	N	145.000	1823.529412	1823.529412	3.5500e-11
DN T0	VY	30.000	4200.000000	4200.000000	2.1700e-16
DN T0	VY	90.000	-4200.000000	-4200.000000	-4.3300e-16
DN T0	VY	145.000	4200.000000	4200.000000	-2.1700e-16
DN T0	VZ	30.000	4240.000000	4240.000000	0.0000e+00
DN T0	VZ	90.000	-4240.000000	-4240.000000	-2.1500e-16
DN T0	VZ	145.000	4240.000000	4240.000000	2.1500e-16

GROUP_MA	Direction	Énergie Référence	Énergie Code_Aster	Erreur
----------	-----------	----------------------	-----------------------	--------

DN TR	DX	9.083900	9.083899	-1.1600e-07
DN TR	DY	35.563390	35.563387	-9.4500 10 ⁻⁸
DN TR	DZ	51.155440	51.155445	9.2600 10 ⁻⁸
DN TR	RX	96.706530	96.706529	-1.5000 10 ⁻⁸
DN TR	RY	144.155340	144.155339	-4.8400 10 ⁻⁹
DN TR	RZ	61.549450	61.549446	-5.8100 10 ⁻⁸
DN T	DX	9.083900	9.083899	-1.1600e-07
DN T	DY	35.563390	35.563387	-9.4500 10 ⁻⁸
DN T	DZ	51.155440	51.155445	9.2600 10 ⁻⁸
DL TR	DX	9.083900	9.083899	-1.1600e-07
DL TR	DY	35.563390	35.563387	-9.4500 10 ⁻⁸
DL TR	DZ	51.155440	51.155445	9.2600 10 ⁻⁸
DL TR	RX	96.706530	96.706529	-1.5000 10 ⁻⁸
DL TR	RY	144.155340	144.155339	-4.8400e-09
DL TR	RZ	61.549450	61.549446	-5.8100 10 ⁻⁸
DL T	DX	9.083900	9.083899	-1.1600e-07
DL T	DY	35.563390	35.563387	-9.4500 10 ⁻⁸
DL T	DZ	51.155440	51.155445	9.2600 10 ⁻⁸
DL T0	DX	9.083900	9.083899	-1.1600e-07
DL T0	DY	35.563390	35.563387	-9.4500 10 ⁻⁸
DL T0	DZ	51.155440	51.155445	9.2600 10 ⁻⁸
DN T0	DX	5.055974	5.055974	-5.5200e-12
DN T0	DY	14.602500	14.602500	0.0000
DN T0	DZ	25.620480	25.620480	1.3900e-16

4 Modélisation B

4.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation 2D_DISCRET

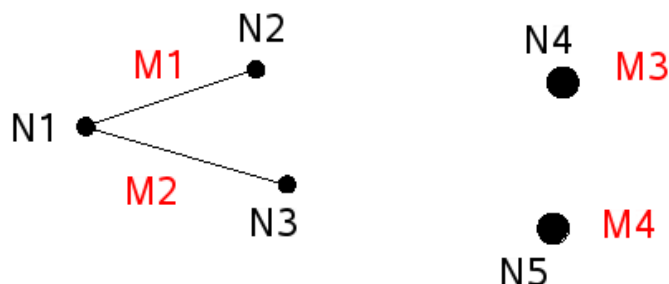


Figure 5.1.a : géométrie.

Caractéristiques des éléments discrets

Maille *M1* : Nœud *N1* à *N2*
Maille *M2* : Nœud *N1* à *N3*
Maille *M3* : Nœud *N4*
Maille *M4* : Nœud *N5*

Modélisation 2D	GROUP_MA
2D_DIS_T	DL_T
2D_DIS_TR	DL_TR
2D_DIS_T	DN_T
2D_DIS_TR	DN_TR

4.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 5, Nombre de mailles : 4, Élément SEG2 : 2, Élément POI1 : 2

4.3 Propriétés des discrets

Le tableau ci-dessous donne pour toutes les directions sollicitées les caractéristiques des discrets.

		F_y	K_e	F_u	k_x	n
DL_T	dx	1000.0	3400000.0	1000.0	700000.0	2.00
	dy	1500.0	2000000.0	800.0	900000.0	1.50
DN_T	dx	1000.0	3400000.0	1000.0	700000.0	2.00
	dy	1500.0	2000000.0	800.0	900000.0	1.50
DL_TR	dx	1000.0	3400000.0	1000.0	700000.0	2.00
	dy	1500.0	2000000.0	800.0	900000.0	1.50
	rz	2500.0	3200000.0	1400.0	850000.0	2.25
DN_TR	dx	1000.0	3400000.0	1000.0	700000.0	2.00
	dy	1500.0	2000000.0	800.0	900000.0	1.50
	rz	2500.0	3200000.0	1400.0	850000.0	2.25

4.4 Grandeurs testées et résultats

GROUP_MA	Effort	Instant	Effort Référence	Effort Code_Aster	Erreur
DN TR	N	30.000	1635.707253	1635.707253	-8.4900e-11
DN TR	N	90.000	-1635.707253	-1635.707253	-8.4900e-11
DN TR	N	145.000	1525.492881	1525.492881	-1.8200e-10
DN TR	N	180.000	-1249.231871	-1249.231871	1.4500e-11
DN TR	N	230.000	1699.177353	1699.177353	-1.6000e-10
DN TR	N	250.000	-415.381013	-415.381013	-1.1200e-10
DN TR	N	280.000	1789.595108	1789.595108	-4.9600e-11
DN TR	VY	30.000	2224.098875	2224.098875	-4.9400e-12
DN TR	VY	90.000	-2224.098875	-2224.098875	-4.9400e-12
DN TR	VY	145.000	2190.040518	2190.040518	-1.0900e-10
DN TR	VY	180.000	-2017.290415	-2017.290415	-1.5500e-10
DN TR	VY	230.000	2239.745512	2239.745512	-6.2600e-12
DN TR	VY	250.000	-790.397664	-790.397663	-3.5800e-11
DN TR	VY	280.000	2258.782745	2258.782745	1.0400e-10
DN TR	MFZ	30.000	3773.863680	3773.863680	4.0200e-11
DN TR	MFZ	90.000	-3773.863680	-3773.863680	4.0200e-11
DN TR	MFZ	145.000	3686.099695	3686.099695	-2.8500e-11
DN TR	MFZ	180.000	-3236.583886	-3236.583886	1.3700e-10
DN TR	MFZ	230.000	3810.233618	3810.233618	6.2600e-11
DN TR	MFZ	250.000	-1262.367026	-1262.367026	5.6200e-11
DN TR	MFZ	280.000	3849.201624	3849.201624	-1.8600e-12

GROUP_MA	Effort	Instant	Effort Référence	Effort Code_Aster	Erreur
DN T	N	30.000	1635.707253	1635.707253	-8.4900e-11
DN T	N	90.000	-1635.707253	-1635.707253	-8.4900e-11
DN T	N	145.000	1525.492881	1525.492881	-1.8200e-10
DN T	N	180.000	-1249.231871	-1249.231871	1.4500e-11
DN T	N	230.000	1699.177353	1699.177353	-1.6000e-10
DN T	N	250.000	-415.381013	-415.381013	-1.1200e-10
DN T	N	280.000	1789.595108	1789.595108	-4.9600e-11
DN T	VY	30.000	2224.098875	2224.098875	-4.9400e-12
DN T	VY	90.000	-2224.098875	-2224.098875	-4.9400e-12
DN T	VY	145.000	2190.040518	2190.040518	-1.0900e-10
DN T	VY	180.000	-2017.290415	-2017.290415	-1.5500e-10
DN T	VY	230.000	2239.745512	2239.745512	-6.2600e-12
DN T	VY	250.000	-790.397664	-790.397663	-3.5800e-11
DN T	VY	280.000	2258.782745	2258.782745	1.0400e-10

GROUP_MA	Effort	Instant	Effort Référence	Effort Code_Aster	Erreur
DL TR	N	30.000	1635.707253	1635.707253	-8.4900e-11
DL TR	N	90.000	-1635.707253	-1635.707253	-8.4900e-11
DL TR	N	145.000	1525.492881	1525.492881	-1.8200e-10
DL TR	N	180.000	-1249.231871	-1249.231871	1.4500e-11
DL TR	N	230.000	1699.177353	1699.177353	-1.6000e-10
DL TR	N	250.000	-415.381013	-415.381013	-1.1200e-10
DL TR	N	280.000	1789.595108	1789.595108	-4.9600e-11
DL TR	VY	30.000	2224.098875	2224.098875	-4.9400e-12
DL TR	VY	90.000	-2224.098875	-2224.098875	-4.9400e-12
DL TR	VY	145.000	2190.040518	2190.040518	-1.0900e-10

DL TR	VY	180.000	-2017.290415	-2017.290415	-1.5500e-10
DL TR	VY	230.000	2239.745512	2239.745512	-6.2600e-12
DL TR	VY	250.000	-790.397664	-790.397663	-3.5800e-11
DL TR	VY	280.000	2258.782745	2258.782745	1.0400e-10
DL TR	MFZ	30.000	3773.863680	3773.863680	4.0200e-11
DL TR	MFZ	90.000	-3773.863680	-3773.863680	4.0200e-11
DL TR	MFZ	145.000	3686.099695	3686.099695	-2.8500e-11
DL TR	MFZ	180.000	-3236.583886	-3236.583886	1.3700e-10
DL TR	MFZ	230.000	3810.233618	3810.233618	6.2600e-11
DL TR	MFZ	250.000	-1262.367026	-1262.367026	5.6200e-11
DL TR	MFZ	280.000	3849.201624	3849.201624	-1.8600e-12

GROUP_MA	Effort	Instant	Effort Référence	Effort Code_Aster	Erreur
DL T	N	30.000	1635.707253	1635.707253	-8.4900e-11
DL T	N	90.000	-1635.707253	-1635.707253	-8.4900e-11
DL T	N	145.000	1525.492881	1525.492881	-1.8200e-10
DL T	N	180.000	-1249.231871	-1249.231871	1.4500e-11
DL T	N	230.000	1699.177353	1699.177353	-1.6000e-10
DL T	N	250.000	-415.381013	-415.381013	-1.1200e-10
DL T	N	280.000	1789.595108	1789.595108	-4.9600e-11
DL T	VY	30.000	2224.098875	2224.098875	-4.9400e-12
DL T	VY	90.000	-2224.098875	-2224.098875	-4.9400e-12
DL T	VY	145.000	2190.040518	2190.040518	-1.0900e-10
DL T	VY	180.000	-2017.290415	-2017.290415	-1.5500e-10
DL T	VY	230.000	2239.745512	2239.745512	-6.2600e-12
DL T	VY	250.000	-790.397664	-790.397663	-3.5800e-11
DL T	VY	280.000	2258.782745	2258.782745	1.0400e-10

GROUP_MA	Direction	Énergie Référence	Énergie Code_Aster	Erreur
DN TR	DX	12.862800	12.862836	2.8000 10 ⁻⁶
DN TR	DY	49.538500	49.538536	7.3200e-07
DN TR	RZ	84.921900	84.921949	5.8100e-07
DN T	DX	12.862800	12.862836	2.8000 10 ⁻⁶
DN T	DY	49.538500	49.538536	7.3200e-07
DL TR	DX	12.862800	12.862836	2.8000 10 ⁻⁶
DL TR	DY	49.538500	49.538536	7.3200e-07
DL TR	RZ	84.921900	84.921949	5.8100e-07
DL T	DX	12.862800	12.862836	2.8000 10 ⁻⁶
DL T	DY	49.538500	49.538536	7.3200e-07

5 Synthèse des résultats

Ces tests permettent de vérifier le bon fonctionnement des éléments discrets 2D et 3D avec le comportement `DIS_ECRO_CINE` et l'utilisation de `STAT_NON_LINE`.