HAL
open science

Etude des performances de Sofa dans des cas de simulations simple et comportant une solution théorique

Robin Exertier

To cite this version:

Robin Exertier. Etude des performances de Sofa dans des cas de simulations simple et comportant une solution théorique. Synthèse d'image et réalité virtuelle [cs.GR]. 2007. inria-00598386

HAL Id: inria-00598386

https://inria.hal.science/inria-00598386v1

Submitted on 6 Jun 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Mars – Juillet 2007

Rapport de stage

Etudiant : Robin Exertier

Tuteurs ICP: Matthieu Chabanas

Tuteur INRIA : Francois Faure

Etude des performances de Sofa dans des cas de simulations simple et comportant une solution théorique.

I.SOMMAIRE

Rapport de stage 1

Etudiant : Robin Exertier 1

Tuteurs ICP: Matthieu Chabanas 1

Tuteur INRIA : Francois Faure 1

Etude des performances de Sofa dans des cas de simulations simple et comportant une solution théorique. 1

I. SOMMAIRE 3

A. Etude de l'influence des différents paramètres du modèle FEM. 5

1. Influence du type d'élément utilisé et de la finesse du maillage. 6

2. Influence du mode de résolution du solver (petite / grande déformation). 9

3. Conclusion sur les caractéristiques des différents maillages. 11

B. Simulation de poutre encastrée soumise à une force de traction en son extrémité. 13

1. Poutre rectangulaire. 13

2. Poutre cylindrique. 14

C. Simulation de poutre encastrée soumise à une force de cisaillement en son extrémité. 15

1. Poutre rectangulaire. 15

2. Poutre cylindrique. 18

D. Simulation de poutre encastrée soumise à son propre poids. 21

1. Poutre rectangulaire. 21

2. Poutre cylindrique. 23

E. Truth Cube et Truth Cylinder. 27

1. Truth Cube. 27

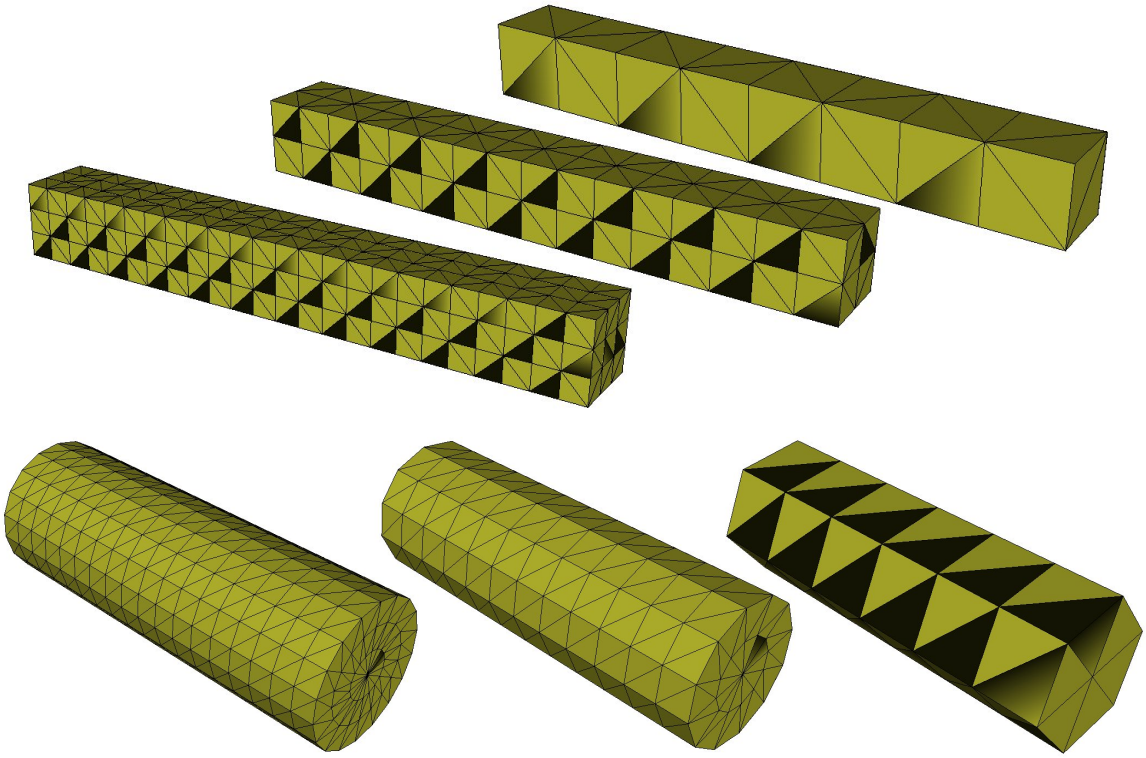
2. Truth Cylinder. 31

F. Conclusion 35

Une erreur a été détecté dans le code de Sofa, dans la fonction « TetrahedronFEMForceField <DataTypes>::computeMaterialStiffness ». Après modification, les résultats obtenus, bien que encore non exacts, sont désormais de l'ordre de grandeur attendu. Des simulations ont permis de comparer les déformations calculées successivement par Ansys, Sofa et Matlab (déformation théorique) avec différents cas de charges et différentes géométries modélisées, et permettent d'évaluer les performances de Sofa et de penser à des évolutions pertinentes pour l'avenir.

A.Etude de l'influence des différents paramètres du modèle FEM.

Nous nous plaçons ici dans un cas de charge bien précis, une poutre de section rectangulaire encastrée et soumise à son propre poids. Nous cherchons alors à caractériser les différents paramètres liés à la modélisation numérique du problème, sans (trop) se soucier de la justesse des résultats. Nous nous intéressons donc aux types d'éléments de modélisation, à la finesse des maillages (*Fig0*) et au mode de résolution (petite – SMALL - ou grande –LARGE- déformation) adopté.



Nb d'éléments	Eléments hexaédriques			Eléments tétraédriques		
	fin	*normal*	*grossier*	*Fin*	*normal*	*Grossier*
Poutre	216	64	8	1080	320	40
Cylindre	972	288	36	4212	1152	108

Fig0 : Maillages fin, normal et grossier des poutres rectangulaires et cylindres.

1.Influence du type d'élément utilisé et de la finesse du maillage.

Pour nos simulations Ansys, nous nous sommes intéressés à 3 types d'éléments différents : les éléments hexaédriques Solid45, les éléments tétraédriques Solid45 et les éléments tétraédriques Solid92 (*Fig1*)..

Les éléments solid45 sont définis par 8 nœuds et permettent de former des hexaèdres. En joignant plusieurs sommets, on peut également définir des prismes ou des tétraèdres. Ce sont des éléments linéaires.

Les éléments tétraédriques Solid92 sont quand à eux définis par 10, et permettent de former des éléments tétraédriques quadratiques nœuds

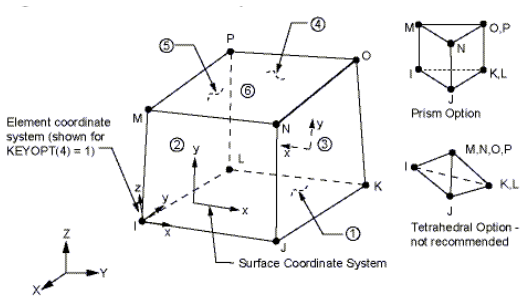


Fig1a : Solid45

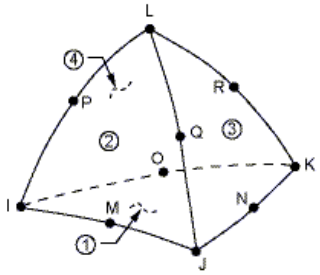


Fig1b : Solid92

Fig1 : Eléments de modélisation utilisés dans Ansys.

La figure suivante (*Fig2*) présente pour trois finesses de maillage différentes les trois courbes relatives aux trois types d'éléments utilisés (simulations Ansys). On remarque que les éléments hexaédriques et tétraédriques 10 nœuds sont relativement proches de la courbe théorique et que seuls les éléments tétraédriques linéaires s'en éloignent, de façon notable quand la finesse du maillage diminue.

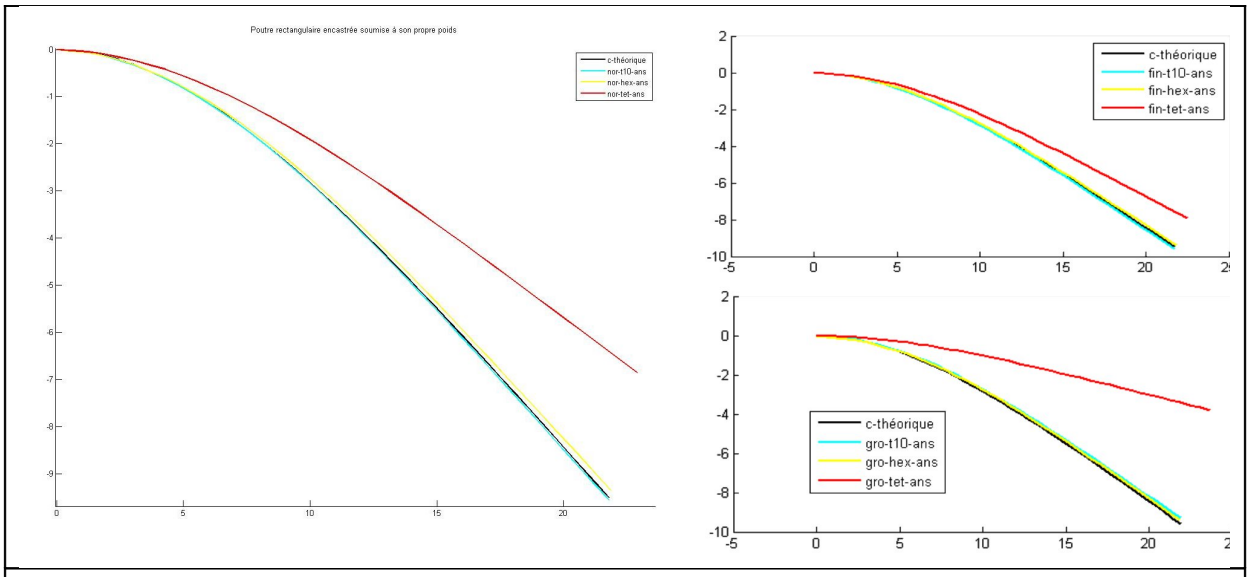


Fig2 : Déformations calculées par Ansys en résolution non linéaire avec les 3 types d'éléments (tétraédriques 10 nœuds, tétraédriques et hexaédriques), pour trois finesses de maillage différentes.
Les éléments hexaédriques et tétraédriques 10 nœuds sont très proches de la théorie.

Pour Sofa, nous n'utilisons que 2 types d'éléments : les hexaèdres (Hexahedron), et les tétraèdres (tetrahedron). Le moteur de calcul de Sofa ne gère que des tétraèdres, les hexaèdres sont donc tessélés en 5 tétraèdres avant calcul, et nous regarderons ici si on peut noter une différence entre ces deux maillages tétraédriques.

Il est à noter que les cylindres maillés avec des hexaèdres ont des éléments prismatiques (WEDGE) adjacents à l'axe de révolution du cylindre. Ces éléments sont également tesséles en 3 tétraèdres pour les calculs SOFA, et sont définis dans Ansys comme le montre *Fig1a*.

Pour une finesse de maillage donnée, on note dans Sofa peu de différences entre les deux types d'éléments disponibles (*Fig3*). Par contre, la finesse du maillage influe grandement les résultats, qui seront plus précis à mesure que le nombre d'éléments augmente, phénomène déjà remarqué pour les éléments tétraédriques d'Ansys (*Fig2*).

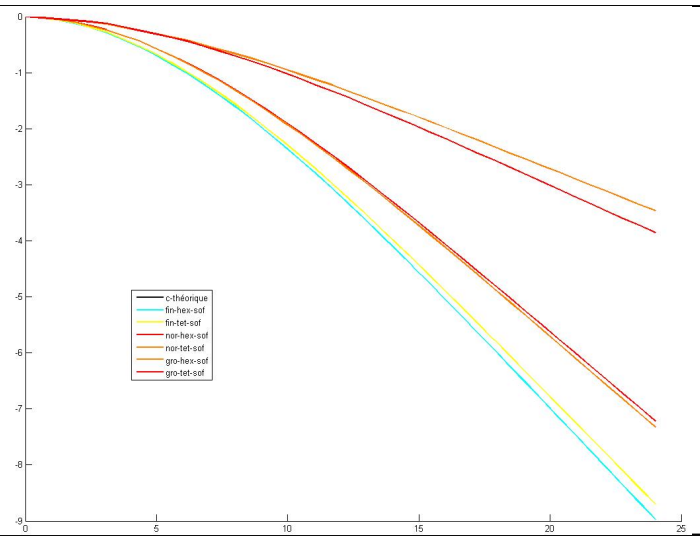
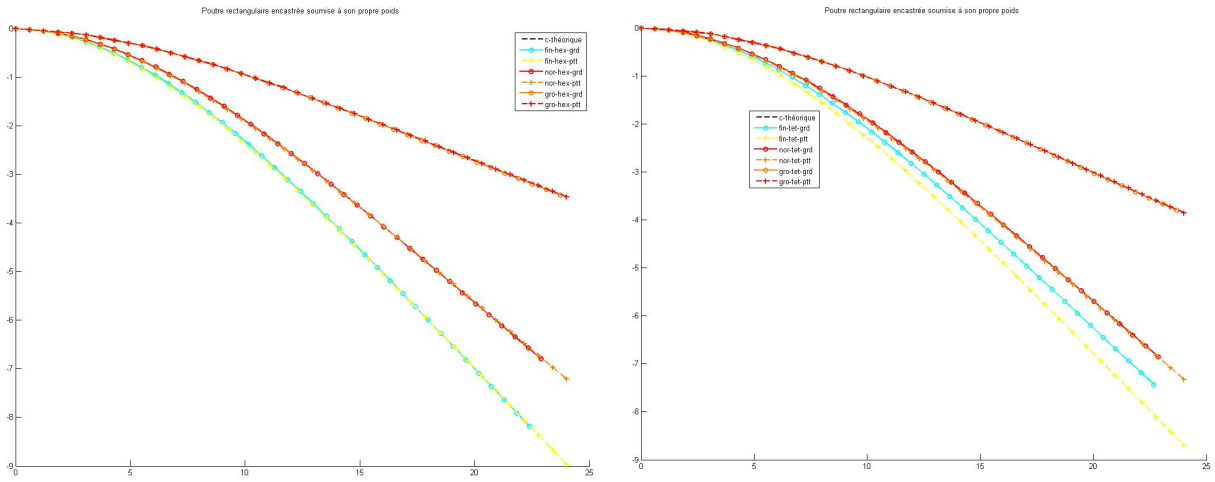


Fig3 : Déformations calculées par Sofa avec les 2 types d'éléments utilisables (tétraédriques et hexaédriques), pour trois finesses de maillage différentes (deformation = SMALL).
On note peu de différence entre les deux types d'éléments, mais la finesse du maillage influe grandement sur les résultats.

2.Influence du mode de résolution du solver (petite / grande déformation).

Que ce soit dans Ansys ou Sofa, on doit apporter une précision sur le type de problème à résoudre : si on est en petite déformations, il est conseillé d'utiliser un modèle de résolution linéaire (SMALL), avec lequel on devrait retrouver la solution théorique, et, au contraire, un modèle de grande déformations (LARGE) donne (en théorie) des résultats plus justes lors de chargement importants, car il permet notamment de garantir la conservation du volume (*Fig4b*).

Nous étudions donc l'influence de ce paramètre sur les résultats des simulations. Que ce soit dans Sofa ou Ansys, on remarque que les différences en terme de flèche sont minimes, mais que les longueurs des poutres ne sont pas conservées (pour des cas de charges importants) en petite déformation, ce qui est normal compte tenu du fait que l'on suppose alors que les nœuds ne se déplacent que dans la direction z.



Maillage hexaédrique *Maillage tétraédrique*

Fig4a : Influence du type de déformation du solveur SOFA. Excepté dans le cas du maillage tétraédrique fin, les deux formes calculées sont très proches. On note cependant que les poutres ont tendance à s'allonger en petite déformation.

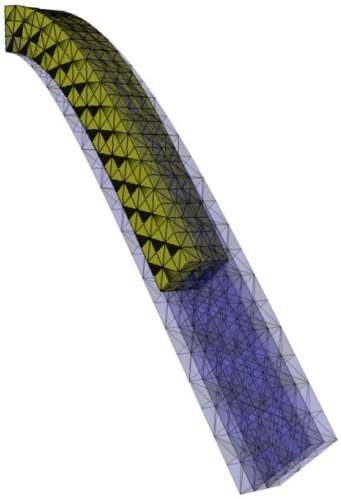


Fig4b : déformée d'une poutre encastrée. Comparaison entre petite (beige) et grande (bleu) déformation.

On observe également le même comportement sous Ansys : en petite déformation, la poutre s'allonge et de dilate afin d'avoir son extrémité à la même position que lorsqu'elle est au repos (*Fig5a*). Par contre, avec des éléments tétraédriques linéaires, les déformées, bien que très proches, ne sont plus confondues tel que dans Sofa (*Fig5b*).La dilatation semble tout de même moins importante dans Ansys que dans Sofa

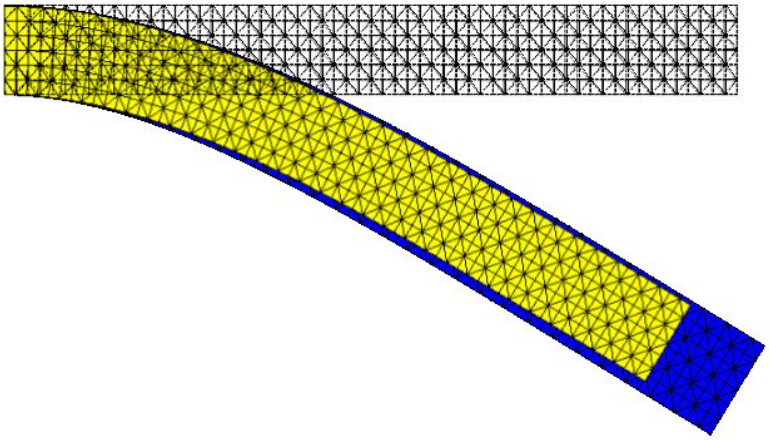


Fig5a : Captures d'écran superposées des simulations Ansys en petite (bleu) et grande (jaune) déformation.

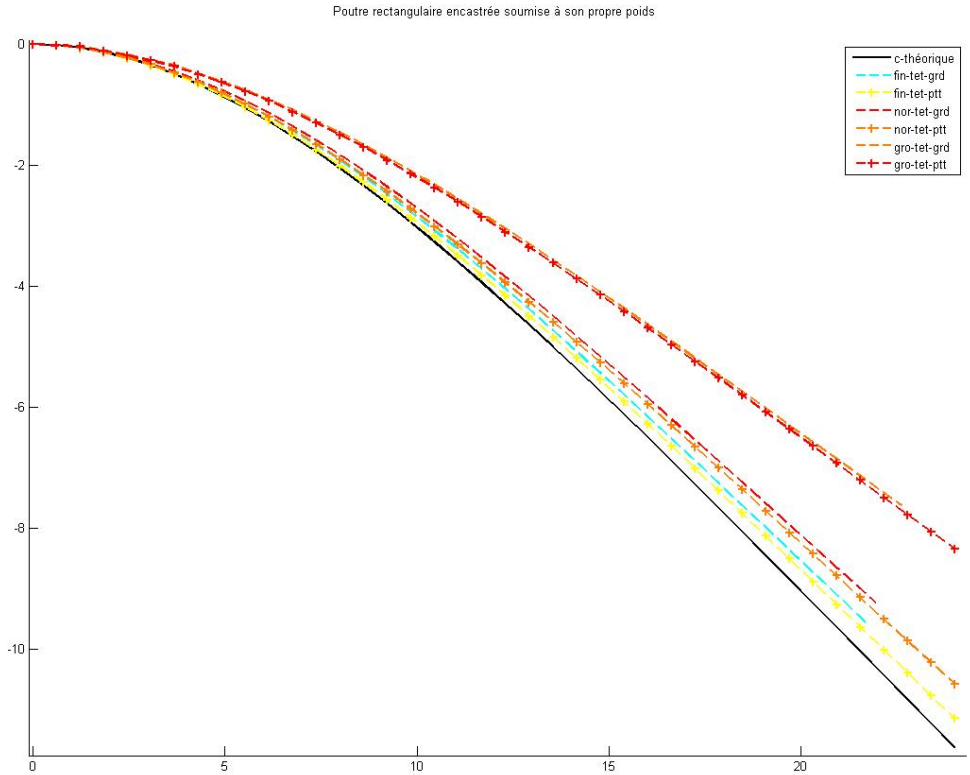


Fig5b : Courbures des poutres déformées, calculées avec des éléments tétraédriques linéaires.

Fig5 : Comparaison entre les simulations Ansys en petite et grande déformation.

3.**Conclusion sur les caractéristiques des différents maillages.**

Dans notre cadre d'étude, où l'on cherche principalement l'ordre de grandeur du résultat plus que sa valeur exacte, il est intéressant de noter la forte ressemblance des comportements obtenus dans Sofa et dans Ansys avec des éléments tétraédriques linéaires (*Fig6*). Ces simulations sont cependant fortement dépendantes de la finesse du maillage, et, lorsque l'on utilise des maillages grossiers, les résultats sont relativement éloignés de la théorie, que vérifie avec une bonne précision les maillages hexaédriques et tétraédriques 10 nœuds d'Ansys (*Fig2*).

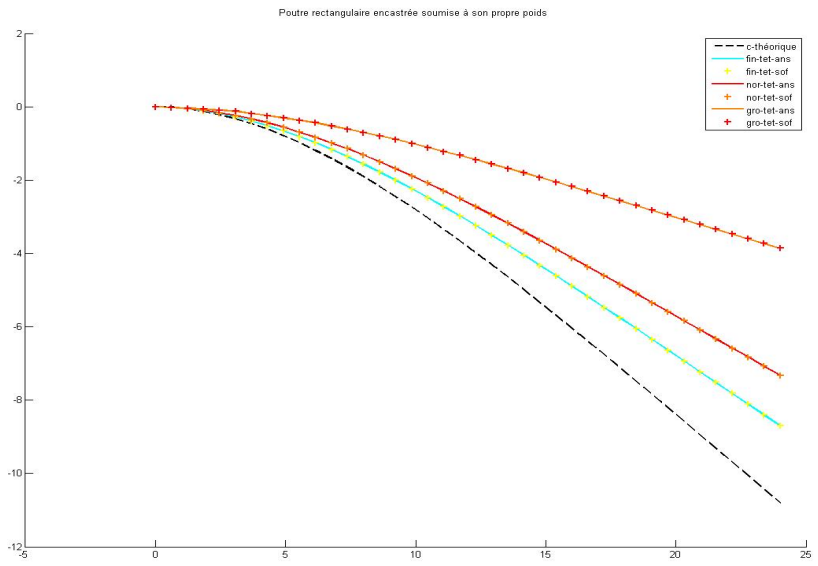


Fig6 : Comparaison des résultats Ansys (traits pleins) et SOFA (croix), pour des éléments tétraédriques, ceci au regard de la solution théorique (--). Pour chaque finesse de maillage, les courbes Sofa et Ansys sont confondues.

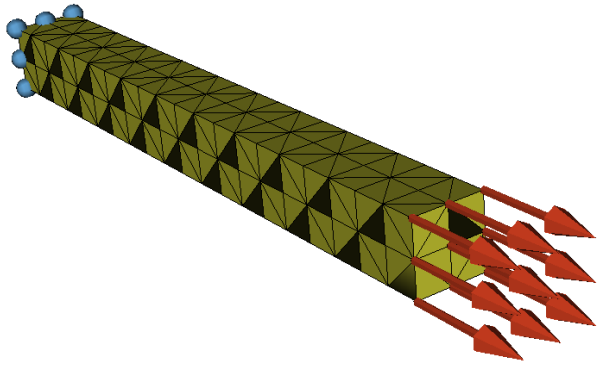
Ainsi, on prendra par la suite comme référence (sauf si une autre est spécifié) indifféremment la courbe théorique, ou une de celles obtenues par Ansys avec des éléments tétraédriques 10 nœuds. Les simulations Sofa se feront quant à elles avec des maillages tétraédriques fins, bien qu'apparaitront souvent des courbes supplémentaires, tant qu'elles ne nuisent pas à la lisibilité des figures.

Tous les cas auront tout de même été générés et observés, et les résultats présentés dans ce rapport sont ceux qui auront été jugés les plus pertinents.

B.Simulation de poutre encastrée soumise à une force de traction en son extrémité.

Ce genre de test, simulation de poutre soumise à une force constante, en plus d'avoir une solution théorique simple, comporte l'avantage de ne pas mettre en jeu les masses et les effets amortissants des matériaux (on utilise le solveur statique sans gravité). On étudie donc les performances du solveur en limitant les sous-programmes d'interprétation de données.

1.**Poutre rectangulaire.**



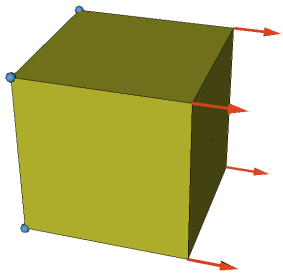
Cette expérience relativement simple a l'avantage d'avoir une solution théorique très simple à calculer ($\Delta l = \frac{F.l}{E.S}$), et peut facilement être testé sur des modèles également simple (un hexaèdre seul, par exemple).

Les résultats des simulations sont donnés dans la feuille Excel suivante, calculs effectués avec un maillage tétraédrique 20*2*2 divisions – 400 éléments (voir illustration) :

F	Ansys (Solid45)-linéaire	Ansys (Solid45)-non linéaire	Sofa normal tétra Large	Sofa normal tétra Small	Théorie	Erreur Large %	Erreur Small	
10000	**2,5**	**2,53163784**	**2,457**	**2,461**	**2,5**	**1,72**	**1,56**	**Δl**
50000	**12,5**	**13,3190842**	**12,68**	**12,306**	**12,5**	**-1,44**	**1,552**	
Young =4000, Poisson =0,0001, S = 100, L= 100								

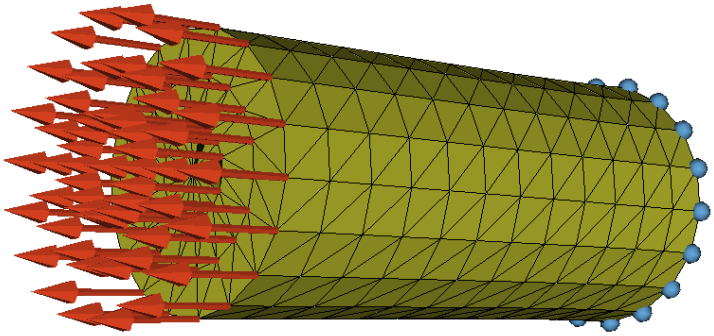
Les différences sont donc acceptable, moins de 2%. On est donc dans l'ordre de grandeur, mais on ne retrouve tout de même pas le résultat théorique attendu en petite déformation, tel que dans le modèle Ansys.

F	Sofa Large	Sofa Small	Théorie	Erreur Large	Erreur small	
10000	**0,2652**	**0,2645**	**0,25**	**6,08**	**5,8**	**Δl**
50000	**1,342**	**1,32**	**1,25**	**7,36**	**5,6**	



La simulation faite avec un seul élément hexaédrique montre que les résultats sont alors moins bons, ce qui peut justifier l'emploie de maillages assez fins. Les temps de calcul SOFA sont assez difficiles à évaluer, mais il est certain que cela joue dessus, et qu'un compromis est à trouver en fonction de l'utilisation de la simulation (rapport rapidité / précision de calcul désiré).

2.Poutre cylindrique.



Une simulation de poutre cylindre en traction a été effectuée pour vérifier les résultats des simulations de poutre rectangulaire. Les calculs ont été faits en petite et grande déformation. Les résultats sont exposés dans les tableaux suivant :

Allongement de la poutre en grande déformation (m).

	Tétra 10 nœuds fin	**Tétra fin**	**Tétra 10 nœuds grossier**	**Tétra grossier**
Ansys	1,1317	1,2368	0,9430	1,1592
Sofa	--	1.2162	--	1,1588
Théorie	**1,2732**			

Allongement de la poutre en petite déformation (m).

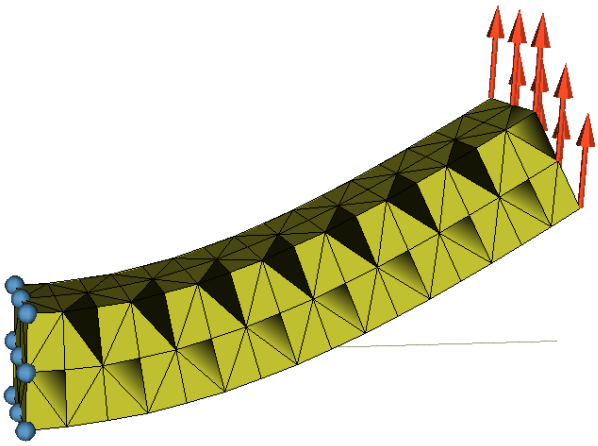
	Tétra 10 nœuds fin	**Tétra fin**	**Tétra 10 nœuds grossier**	**Tétra grossier**
Ansys	1,2048	1,1258	0,8722	1,0593
Sofa	--	1.1258	--	1,0593
Théorie	**1,2732**			

Fig7 : Simulation d'une poutre cylindrique de l=20m, r=5m, E=4000Pa, Poisson = 0.49 et F = 20 000 N

Ces résultats ne sont pas très bons en terme de précision, et il semble que même les maillages quadratiques d'Ansys s'écartent de la solution théorique et sont sensible à la finesse du maillage. Il est cependant intéressant de remarquer qu'en petite déformation, les résultats Sofa et Ansys sont identiques pour des maillages tétraédriques linéaires, ce qui confirme la remarque de la figure 6 (*Fig6*).
Les résultats en petite déformation sont tout de même éloignés du résultat théorique, contrairement au cas de la poutre rectangulaire encastrée, dont les solutions coïncident parfaitement. Les valeurs obtenues avec des éléments hexaédriques sont dans le même ordre de grandeur, avec des variations comparables, ce qui apporte un doute sur la précision des résultats des simulations de poutres cylindriques.

C.Simulation de poutre encastrée soumise à une force de cisaillement en son extrémité.

1.**Poutre rectangulaire.**



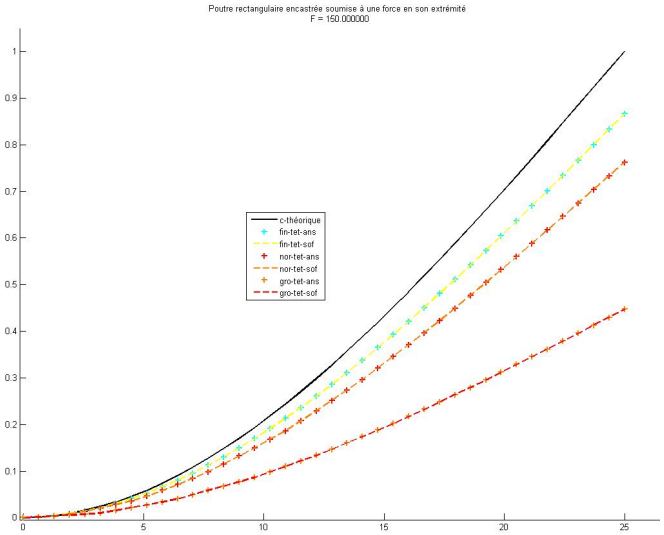
La solution théorique de cette expérience s'obtient à partir de l'équation de la flèche d'une poutre :

(1) $E.I.y''(x) = -Mf(x)$ avec $Mf(x)$ le moment fléchissant en tout point de la poutre, alors considérée sans volume.
$Mf(x) = F(l - x)$

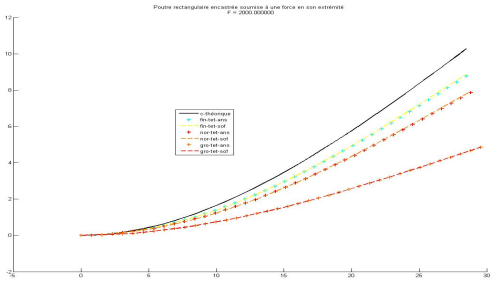
En intégrant deux fois *(1)*, et en posant comme condition aux limites : $\begin{cases} y'(0) = 0m/s \\ y(0) = 0m \end{cases}$, on obtient l'expression suivante :

$$(2) \quad y(x) = \frac{F.x^2}{2.E.I}(l - \frac{x}{3})$$

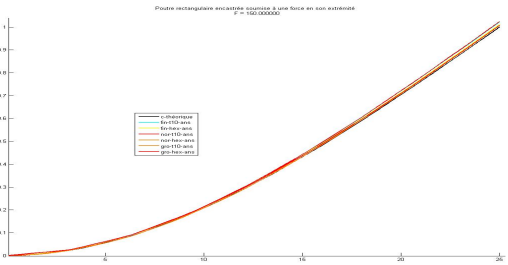
Les résultats des différents tests sont conformes à nos prédictions énoncées en première partie : les simulations Ansys en tétraèdres 10 nœuds et en hexaèdres sont proches de la courbe théorique, tant en petite qu'en grande déformation. De même, les calculs effectués par Sofa donnent des résultats très proches de ceux obtenus avec les éléments tétraédriques linéaires d'Ansys. Dans chacun de ces deux cas, et quelques soit la finesse de maillage, les poutres simulées se déforment moins que la poutre théorique (*Fig8*).



Petite déformation – tétraèdres Sofa et Ansys. F = 150 N



Grande déformation – tétraèdres Sofa et Ansys.
*F = 2000 N – Poute 30*6*6 m^3*



Courbes Ansys (tetraèdres 10noeuds, hexaèdres)

Fig8 : Déformation d'une poutre encastrée soumis à un effort en son extrémité.
*Poutre de 25*5*5 m^3, maillages 8*1*1,16*2*2 et 24*3*3.*
E=15 000 Pa, poisson = 0.3

En augmentant sensiblement la finesse du maillage, on se rapproche de la solution théorique, mais au détriment du temps de calcul, qui devient alors important (*Fig9*) : on compte environ 50 secondes pour ouvrir le pml (8642 éléments), et 7 minutes environ pour la résolution du maillage en question.

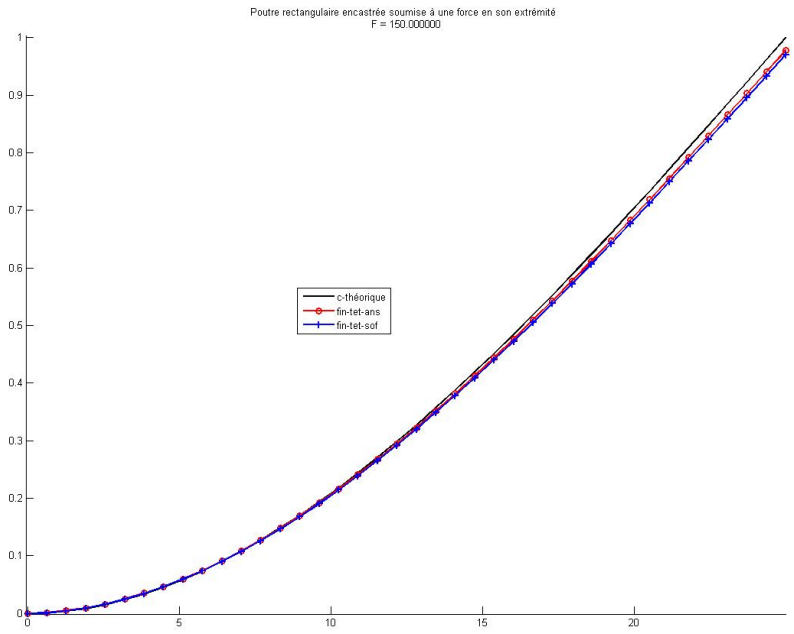
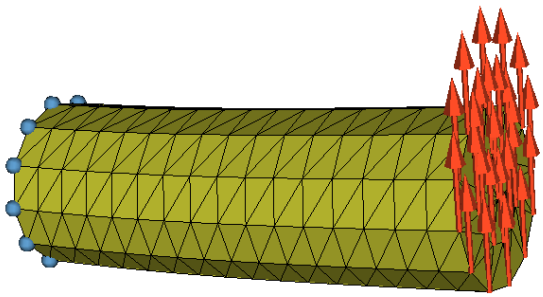


*Fig9 : Poutre de 25*5*5 m^3, maillage 48*6*6, E=15 000 Pa, poisson = 0.3*

2.**Poutre cylindrique.**



Les simulations de cylindre encastré soumis à un effort tranchant en son extrémité apportent également un doute quand à la précision des calculs Ansys (*Fig10*). Tous comme avec un effort axial, les résultats des simulations, même celles effectuées avec des éléments quadratiques, manquent de précision face aux courbes théoriques. Ceci même en petite déformation, cadre dans lequel on peut se fier aux courbes théoriques, dont cette hypothèse doit être vérifiée.

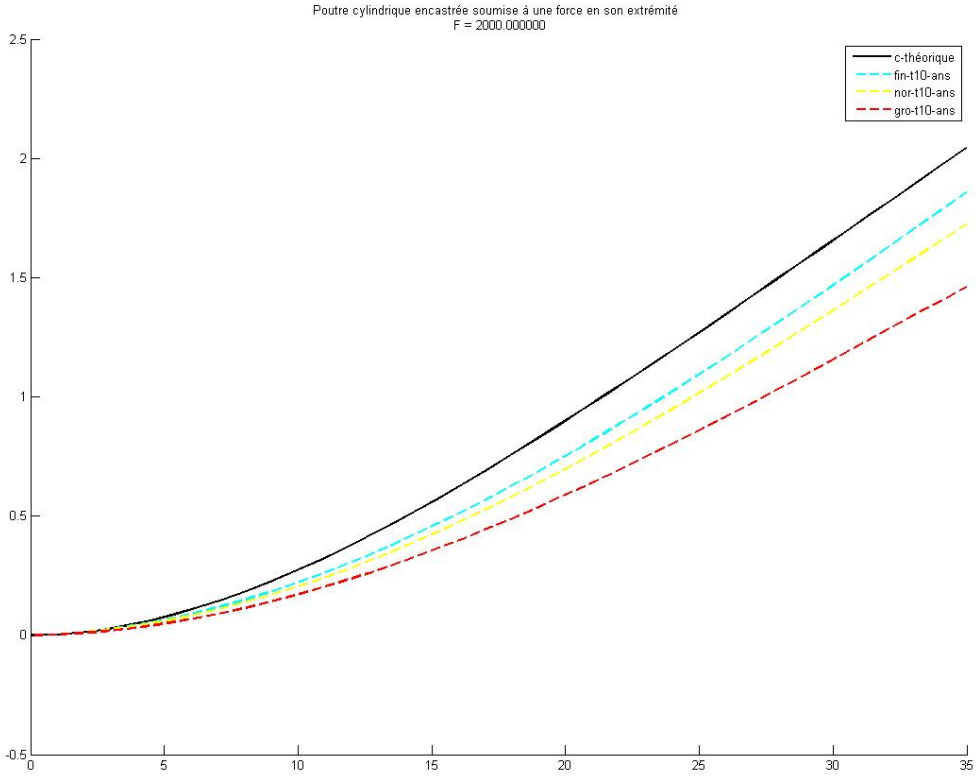


Fig10a : Résultats des simulations Ansys en tétraèdres 10 nœuds. Les écarts entre les différentes finesses de maillage sont plus importants dans les cas de poutre cylindrique que de poutre à section rectangulaire

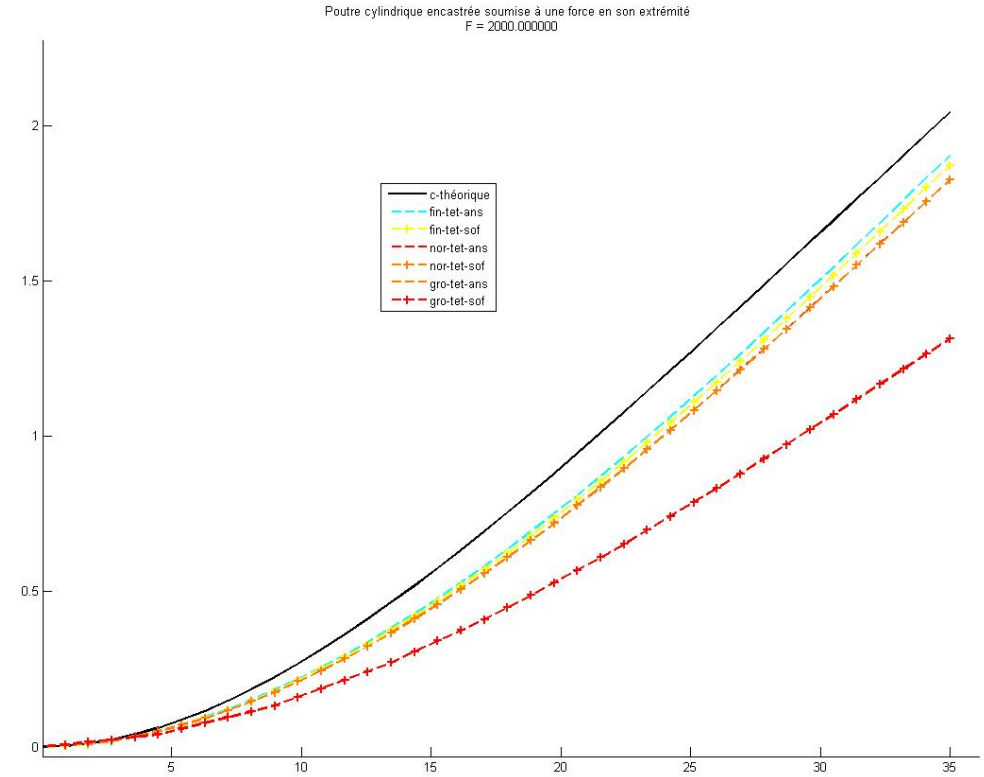


Fig10b : Comparaison entre les courbes issues d' Ansys et de Sofa pour des poutres maillées avec des éléments tétraédriques linéaires. On obtient le même genre de résultats qu'avec des poutres rectangulaires (Fig8) i.e. courbes confondues.

Fig10 : Poutre cylindrique l=35m, r=6m, E=15000Pa, poisson = 0.3, F=2000N,

petite déformation

Ce test nous apporte donc la confirmation de deux choses :

- Les calculs faits avec les éléments tétraédriques linéaires d'Ansys et de Sofa restent très proches,
- Les simulations de poutres cylindriques sont, dans Ansys et Sofa, moins fiables que les simulations de poutres rectangulaires.

On s'attend donc, dans le cas suivant (poutres dans un champ gravitationnel), à retrouver les comportements similaires.

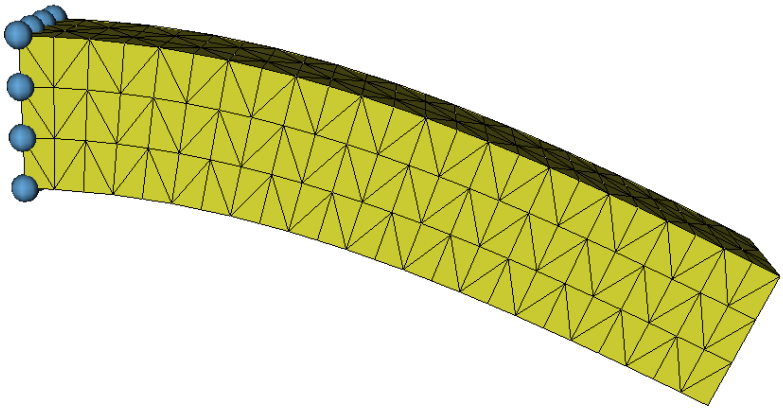
D.Simulation de poutre encastrée soumise à son propre poids.

Ces simulations prennent désormais en compte les paramètres de masse. Il existe dans Sofa deux façons de déclarer des masses : On peut définir au choix la masse de chaque nœud (Mass), ou une masse volumique (Density). Le premier cas créera une « UniformMass », où chaque nœud aura une masse égale au paramètre ''Mass'' du fichier pml, et le deuxième une « DiagonalMass », où la masse de chaque nœud sera calculée en fonction du volume, du nombre d'élément auquel appartient le nœud et de la masse volumique définie dans le pml. Ce dernier cas est plus proche de la réalité physique des expériences, et sera donc privilégié.

En reprenant l'équation *(1)*, avec $Mf(x) = \rho.g.\pi.r^2\left(\frac{-l^2}{2} + l.x - \frac{x^2}{2}\right)$, on obtient l'équation théorique de la flèche d'une poutre de masse volume ρ :

$$(2)\quad y(x) = \frac{\rho.g.S}{2.E.I}.\left(\frac{-l^2.x^2}{2} + \frac{l.x^3}{3} - \frac{x^4}{12}\right)$$

1.**Poutre rectangulaire.**



L'étude de la déformation de ces poutres n'apporte pas de précision supplémentaire par rapport aux remarques des simulations précédentes. On se contentera donc de vérifier celles-ci – courbes issues des tétraèdres confondues, influence du maillage… (*Fig11*) et d'étudier l'influence des différentes définitions de masse (*fig12*).

Les écarts entre les résultats obtenus à partir des deux définitions ne sont pas très grands, et on remarque que poutres dont les masses sont déclarées par « density » se déforment plus que celles définies par « mass ».

La définition d'une masse volumique se rapproche plus de la réalité, la masse de chaque nœud étant alors calculée séparément et de façon à prendre en compte l'appartenance d'un nœud à plusieurs éléments. Pour cela, il pourrait être intéressant par la suite de pouvoir calculer les masses de chaque nœud à partir de la déclaration de la masse totale de l'objet. Ceci existe dans les fichiers scène (.scn – avec le tag « totalMass »), mais pas encore dans les fichiers pml (.pml).

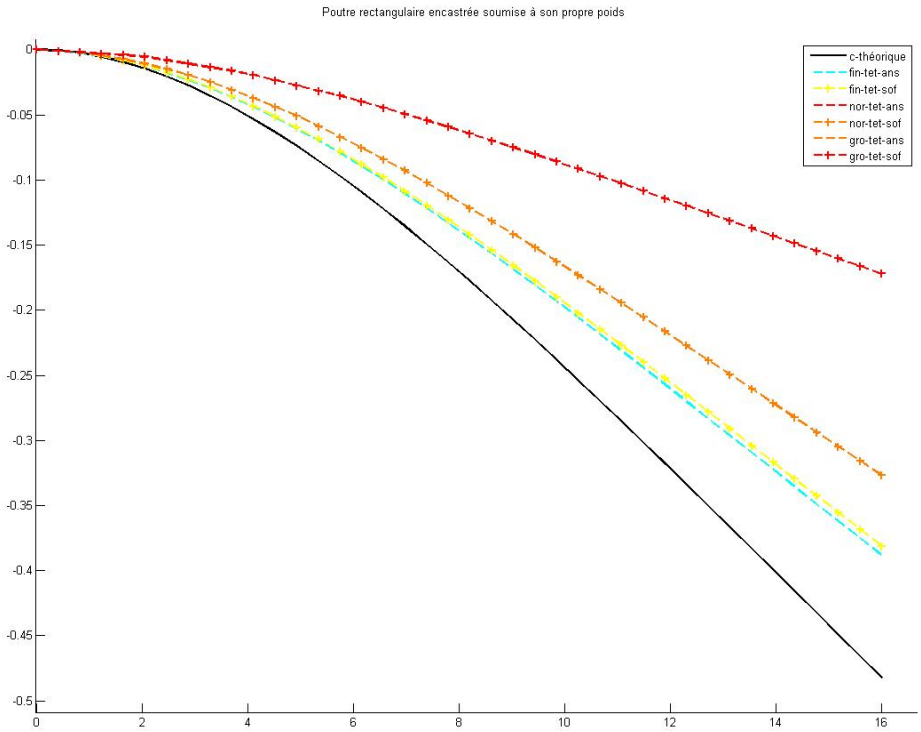


*Fig11 : Poutre de 16*2*2m^3, maillage 8*1*1 division.*
E=15000 Pa, poisson=0.3, ρ=0.03 kg/m^3.
Résolution en petite déformation

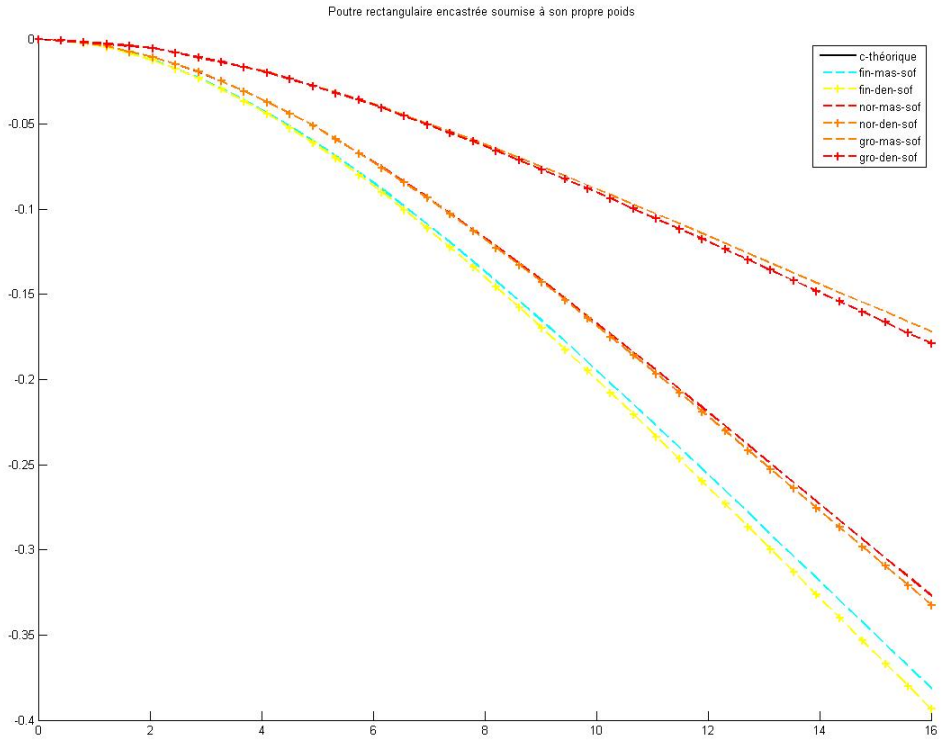
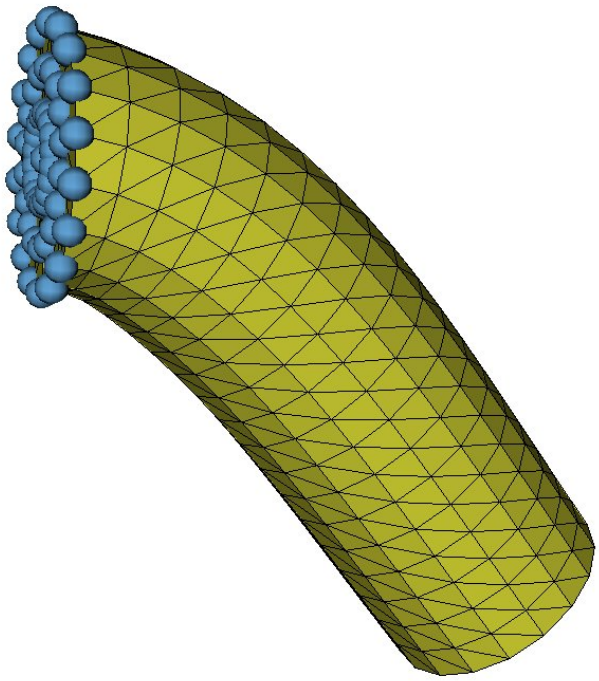
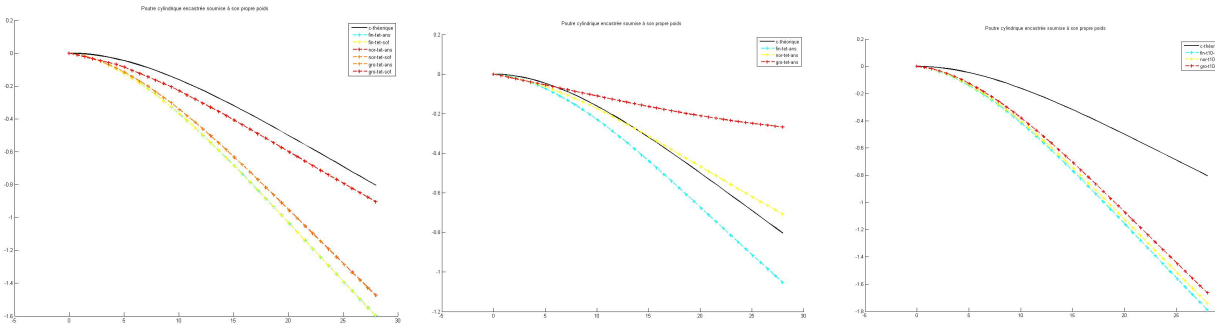


Fig12 : Comparaison des déformations de poutres définies par une masse volumique (den cf « density ») et la masse de chaque nœuds (mas, cf « mass »). Même poutre que fig11. Les écarts ne sont pas très grands, et on remarque que les poutres définies par « density » se déforment plus que celles définies par « mass ». Deformation = SMALL

2.**Poutre cylindrique.**



Ce cas de simulation est plutôt particulier par les résultats obtenus. Ce sont les moins bon de tous les tests qui ont été fais, comme le montrent les figures suivantes.



a: Les courbes « tétraèdres » ansys et Sofa restent confondues. Poisson = 0.3

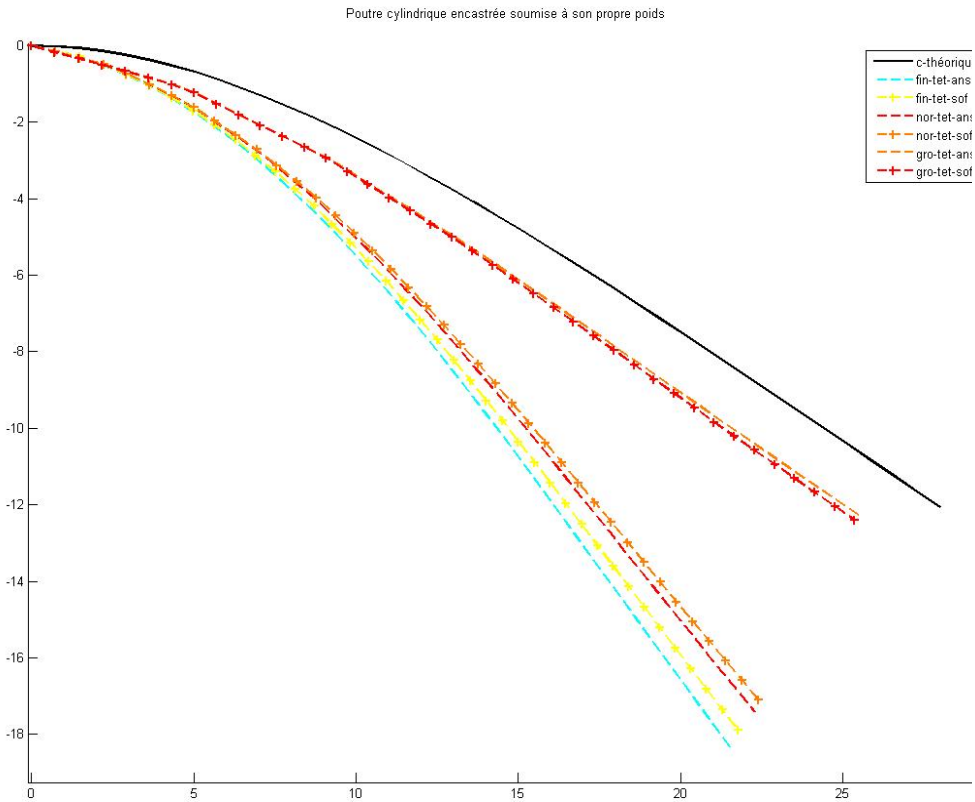
b : Tétraèdre Ansys, poisson = 0.49. Gros écart entre les différents maillages.

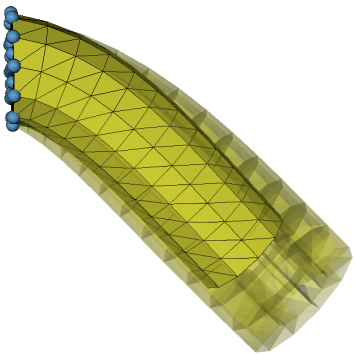
c : Tétraèdres 10 nœuds Ansys, poisson = 0.3. Gros écart entre Ansys et la théorie.

Fig13 : Poutre l=28m, r=5m, E=15000, ρ=0.2 kg/m^3, résolution en grande déformation

Au regard de ces résultats, on peut remettre en question la courbe théorique. Le fait est que celle-ci semble tout à fait correcte pour des poutres rectangulaires, dont seules les expressions de la surface et de l'inertie varient, expressions simples et exactes : $\begin{cases} I = \dfrac{\pi.d^4}{32} \\ S = \pi.r^2 \end{cases}$

Ceci confirme les résultats des parties précédentes, dont on mettait en doute l'exactitude des simulations de chargement d'objets cylindriques. Il pourrait être utile d'en déterminer la cause, mais ce problème ne semble pas propre à Sofa, étant donnés les résultats d'Ansys.
On obtient le même genre de résultats avec de plus gros chargement (ρ=3 kg/m^3, où la flèche calculée la plus grande – maillage fin sofa - est de 18 m environ), calculs effectués en linéaire (ou SMALL dans Sofa) et non linéaire (Large) (*Fig14*).

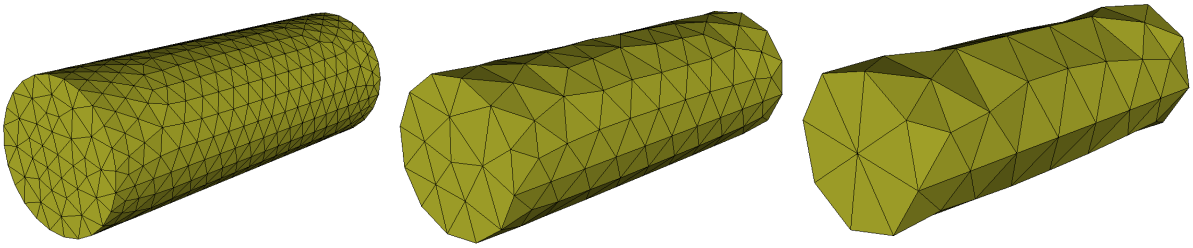




Résultats visuels en petite et grande déformation

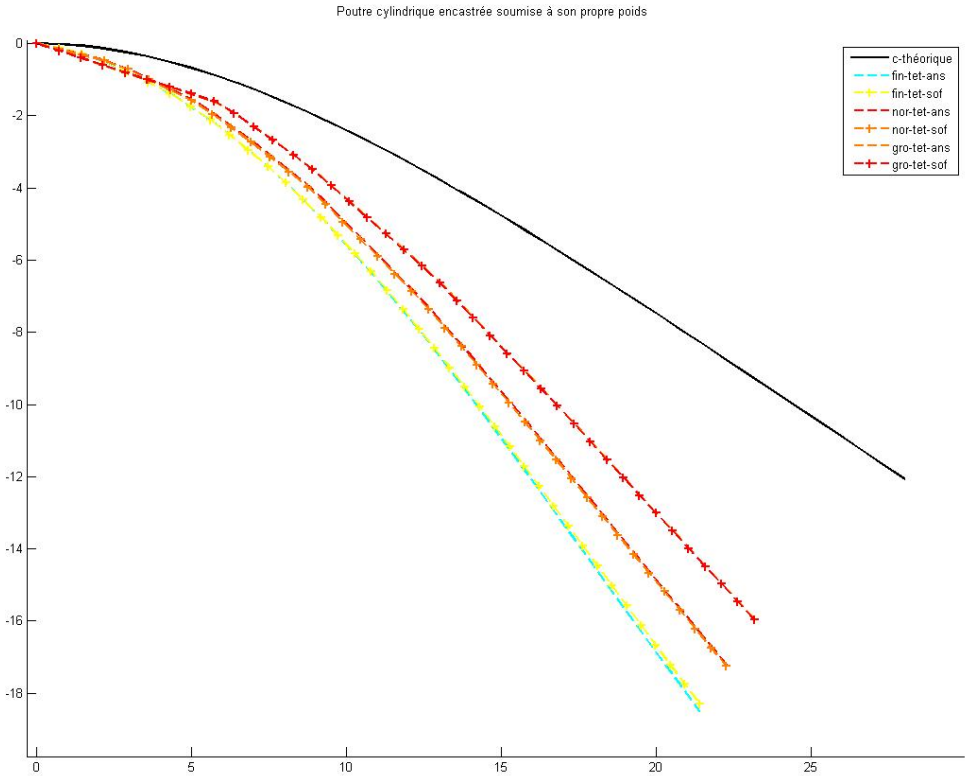
Fig14 : Poutre l=28m, r=5m, E=15000, ρ=3 kg/m^3, résolution en grande déformation

Afin vérifier les résultats précédents, les calculs ont été refait avec des cylindres maillés par Ansys (*Fig15*). D'après les constatations précédentes (*résultats plus proches de la théorie avec des maillages grossiers*), et au regard du nombre d'éléments de chaque maillage, on ne peut conclure sur une meilleure ou moins bonne efficacité de ces maillages. Cependant, si on veut garder des formes réalistes, on ne peut réduire davantage les finesses de maillage, sans quoi nous obtiendrions des formes absurdes.



Maillages générés par Ansys, convertis en PML.

	Maillage tétraédrique		
Nombre d'éléments	Maillage fin	Maillage normal	Maillage grossier
Maillage régulier	4212	1152	108
Maillage automatique	6113	834	214



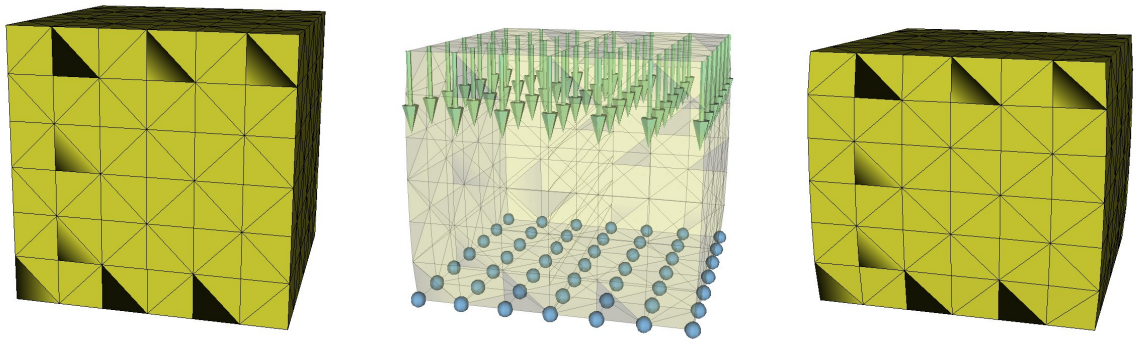
Courbes calculées dans Ansys et Sofa.
Pour chaque finesse, les courbes Ansys et Sofa sont toujours très proches

Fig15 : Simulations effectuées avec des maillages non réguliers, générés par Ansys.

E.Truth Cube et Truth Cylinder.

Ces deux expériences consistent à bloquer une face de l'objet et à imposer un déplacement à celle opposée. On mesure alors le déplacement de chacun des points, d'une tranche ou du contour de l'objet, que ce soit une expérience réelle (cube de silicone, incrusté de billes métalliques dont on peut facilement mesurer les positions), ou une simulation numérique faite avec différents logiciels de calcul (Ansys ou Sofa par exemple).
Ces simulations ont la particularité d'avoir le déplacement connu de deux faces, et on calcul donc la forme de l'objet sous contrainte. Pour des matériaux linéaires, et en statique, cela implique que seuls le coefficient de poisson et la valeur du déplacement imposé vont influencer les résultats (en plus des paramètres liés à la modélisation numérique).

1.**Truth Cube.**



Pour les simulations de Truth Cube, on construit un cube de dimension fixe (80*80*80 m^3, avec un décalage connu de l'origine), et on va ensuite interpoler les résultats sur des points précis du maillage, correspondant à une tranches de cube réel dont on connait les résultats des expériences (*Fig166*.

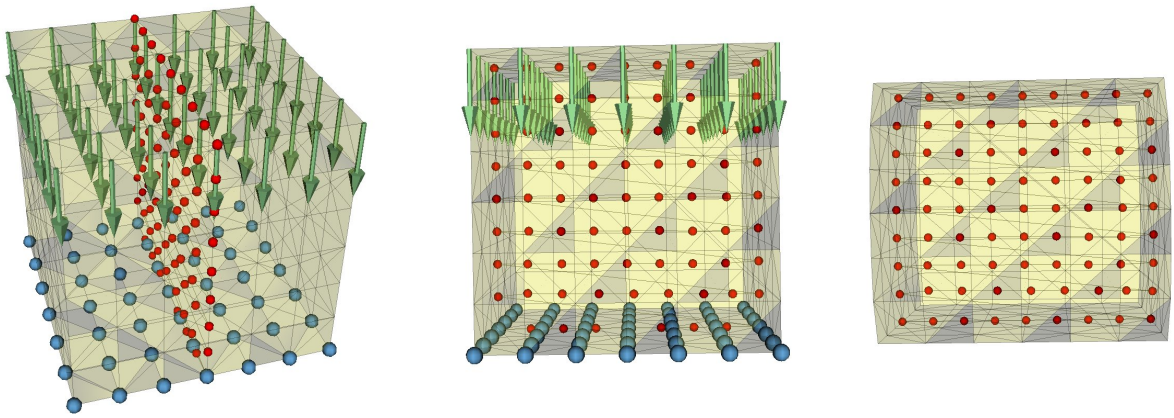


Fig16 : Les résultats des calculs sont interpolés aux nœuds rouges, qui correspondent à la position des billes d'une tranche du cube réel servant pour les mesures.

Pour de petites déformation, les simulations Ansys et Sofa sont très proches, quelque soit le type d'élément et la finesse du maillage utilisé (*Fig17a*).
Par contre, en imposant de plus grandes déformations, les maillages Sofa rencontrent des problèmes. Sans se casser réellement, les déformations semblent peu cohérentes, certains résultats ne sont plus interpolés, et on constate des différences importantes entre Ansys et Sofa en petite et grande déformation (*fig18*).

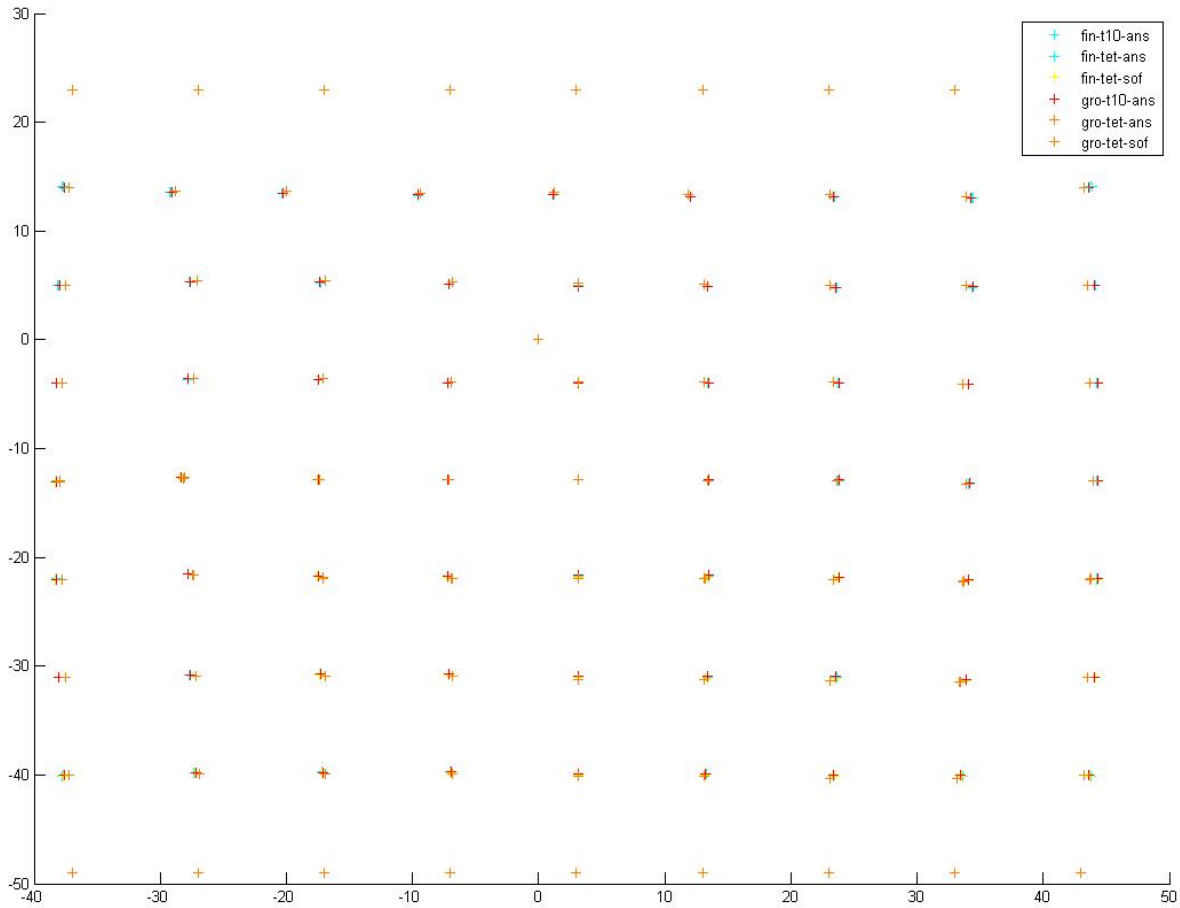


Fig17 : Truth Cube : E =14.9 kPa, poisson = 0.49, Résultats pour un déplacement de la face supérieure de 10%

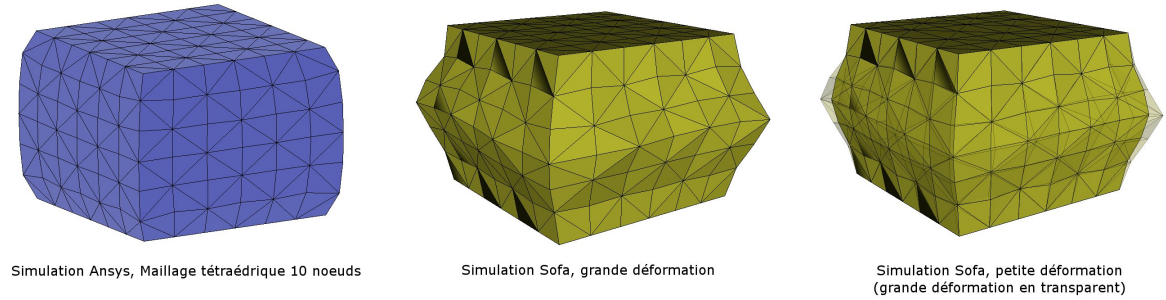


Fig18a : Résultats visuels de différentes simulations numérique de truth cube

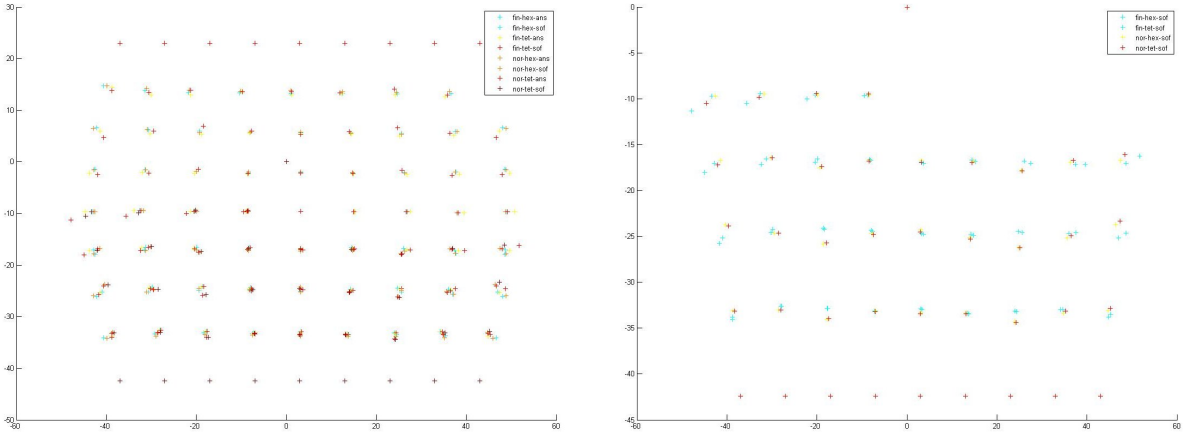


Fig18b : Positions de billes de la ranche milieux : sur la figure de droites, seules les simulations Sofa en petite et grande déformation apparaissent. Les point d'ordonnée supérieur à -10 n'on pas été interpolés, certainement à cause d'une rupture du maillage.

			Mean (%)	Min (%)	Max (%)	Std Dev	Speed (ms/step)
Tetrahedra	Linear		2.08	0.27	5.32	1.03	40
	QR	no B updating	1.69	0.10	4.78	0.94	57
		B updating	2.13	0.64	5.39	0.91	58
	Polar	no B updating	2.24	0.44	5.37	1.05	75
		B updating	1.77	0.15	4.25	0.88	80
		B and V updating	1.81	0.18	3.96	0.84	81
Hexahedra	QR	no B updating	-	-	-	-	-
		B updating	1.76	0.09	4.36	0.92	150
	Polar	no B updating	4.97	0.91	9.57	1.89	24
		B updating	1.82	0.14	4.16	0.87	150
	Ansys	small deformation	1.97	0.44	5.18	1.00	
		large deformation	1.78	0.20	4.83	0.91	
	Phymul		2.69	0.33	6.72	1.16	12

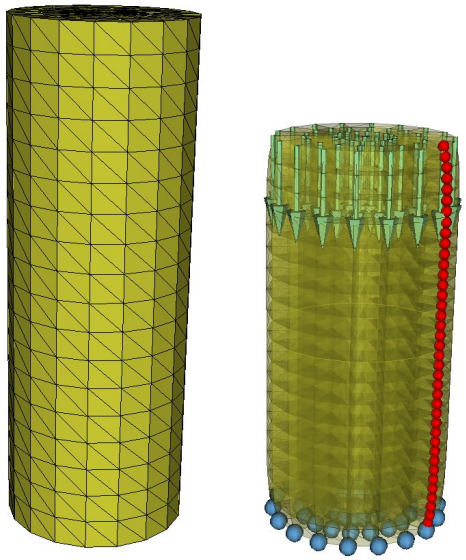
$$\left(\frac{\|real_position - simulated_position\| \ (mm)}{truthcube_size \ (80mm)} \times 100\right)\%$$

Fig18c : Résultats provenant de la publication 'Physically Realistic Interactive Simulation for Biological Soft Tissues - Matthieu Nesme, Maud Marchal, Emmanuel Promayon, Matthieu Chabanas, Yohan Payan, François Faure '.

Les résultats Ansys (en hexaèdres) sont donc proches de ceux mesurés, et valident donc les calculs Ansys.

Fig18 : Truth Cube : E =14.9 kPa, poisson = 0.49, Résultats pour un déplacement de la face supérieure de 18.25%

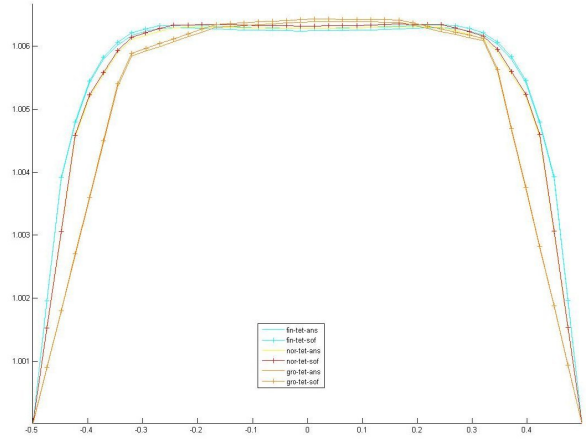
2.**Truth Cylinder.**



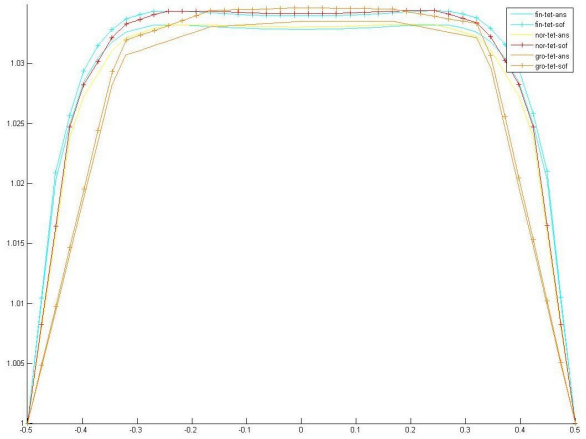
Cette expérience permet d'étudier les déformations de cylindres pour des déplacements imposés sur les deux faces (compression ou traction). On remarque alors que les résultats Ansys et Sofa sont dans le même ordre de grandeur, mais, comme dans les autres cas de test sur les cylindres, les différences entre différentes simulations (finesse de maillage, logiciel utilisé…) restent tout de même conséquentes (*Fig19*). N'ayant pas de théorie simple à ce sujet, et ne disposant pas de résultats expérimentaux, on ne sait pas quelle courbe prendre pour référence.

Les courbes données par Sofa se déforment moins que celle d'Ansys, mais les formes sont tout de même cohérentes entre elles.

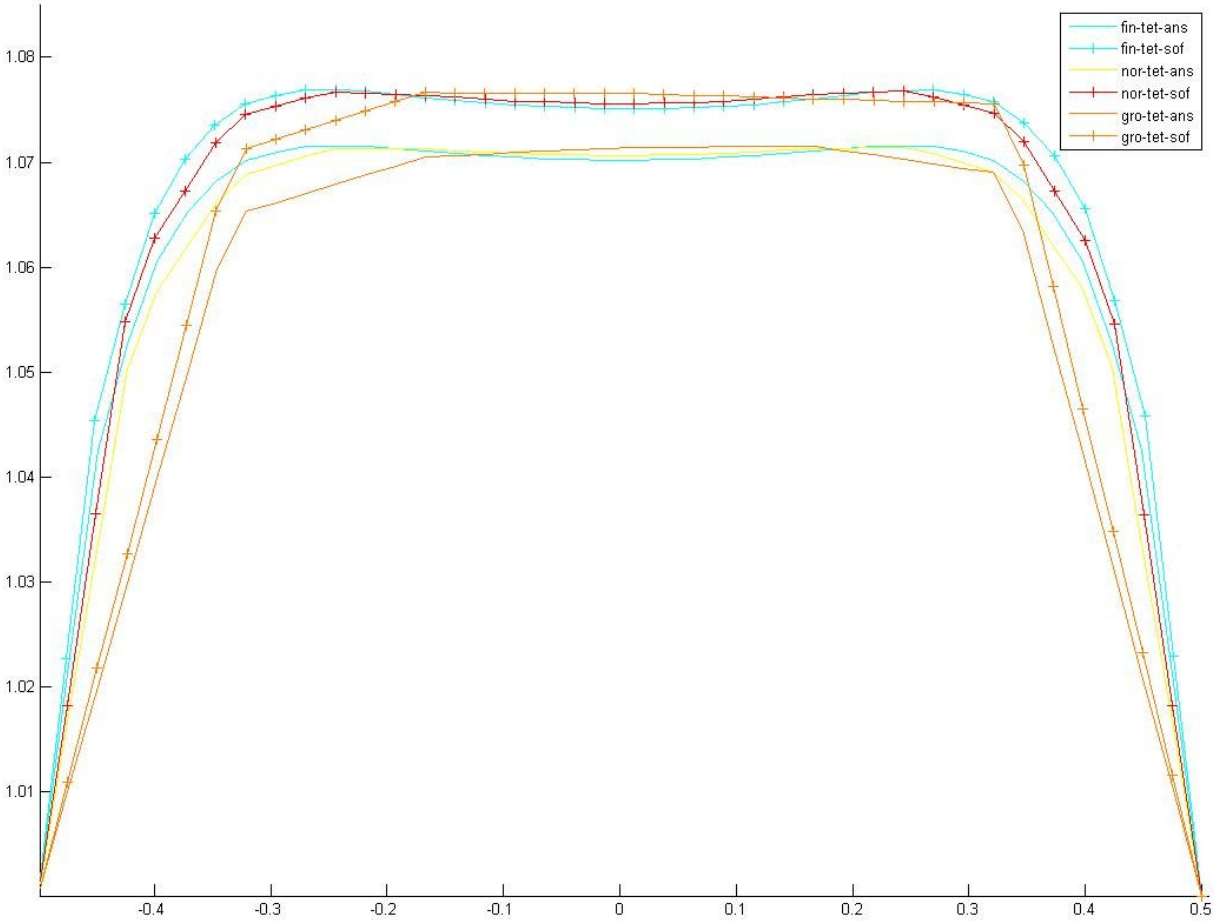
On remarque que les cylindres de Sofa ont tendance à se « vriller » assez fortement, alors que dans Ansys, ces déplacements restent minimes (*Fig20*), ce qui peut expliquer la différence entre les résultats observés. Les maillages ne sont pas symétriques, ce qui peut expliquer ces déplacements « parasites ».



-2 %



-10 %



-20 %

Fig19 : Résultats en grandes déformation des simulations de Truth Cylinder pour des déplacements de la face inférieure de 2, 10 et 20 %.
Cylindre l= 28m, r=5m, E=15000 Pa, poisson = 0.3.
Les courbes données par Sofa se déforment moins que celle d'Ansys, mais les formes sont tout de même cohérentes.

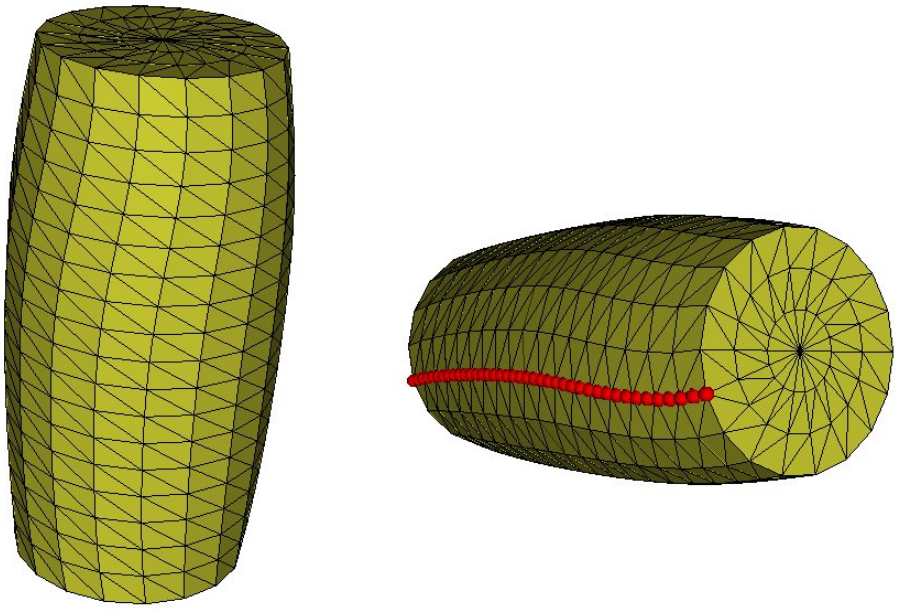


Fig20a : Les cylindres simulés dans Sofa ont tendance à se vriller, d'autant plus fort que la compression est importante. La capture si dessus provient d'une simulation imposant un déplacement d'une face de 20% de la longueur du cylindre.

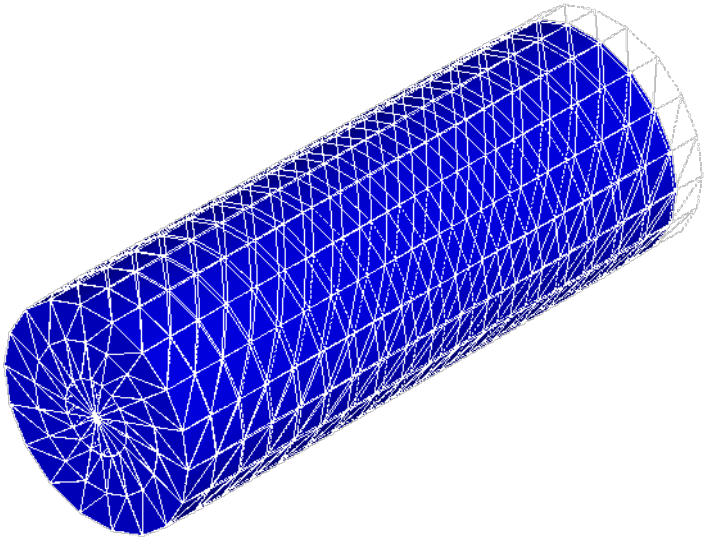


Fig20b : Sans être totalement absent des simulations, l'effet de vrille est beaucoup moins important dans les simulations Ansys.

Les simulations de cylindres sont donc moins précises que celles de cubes, mais les maillages semblent plus « solides ». En effet, même pour de grandes déformations, les maillages ne se cassent pas. Sans doute, le fait que le maillage se vrille le détend un peu, et limite alors les instabilités numériques.

Afin de tenter de limiter cet effet de vrille, on effectue les mêmes simulations avec des cylindres maillés de façon non régulières, comme dans la partie D.2.

Les résultats ne sont alors pas améliorés, bien au contraire (*Fig21*). Le modèle de cylindre n'est plus du tout respecté, surtout lorsque le maillage devient grossier (*fig15*), et alors certains nœuds d'interpolation n'appartiennent plus au volume. Les résultats semblent tout de même sauvegardés, mais on est loin d'obtenir une forme exploitable. L'ordre de grandeur es résultats est tout de même le même que dans les simulations précédentes.

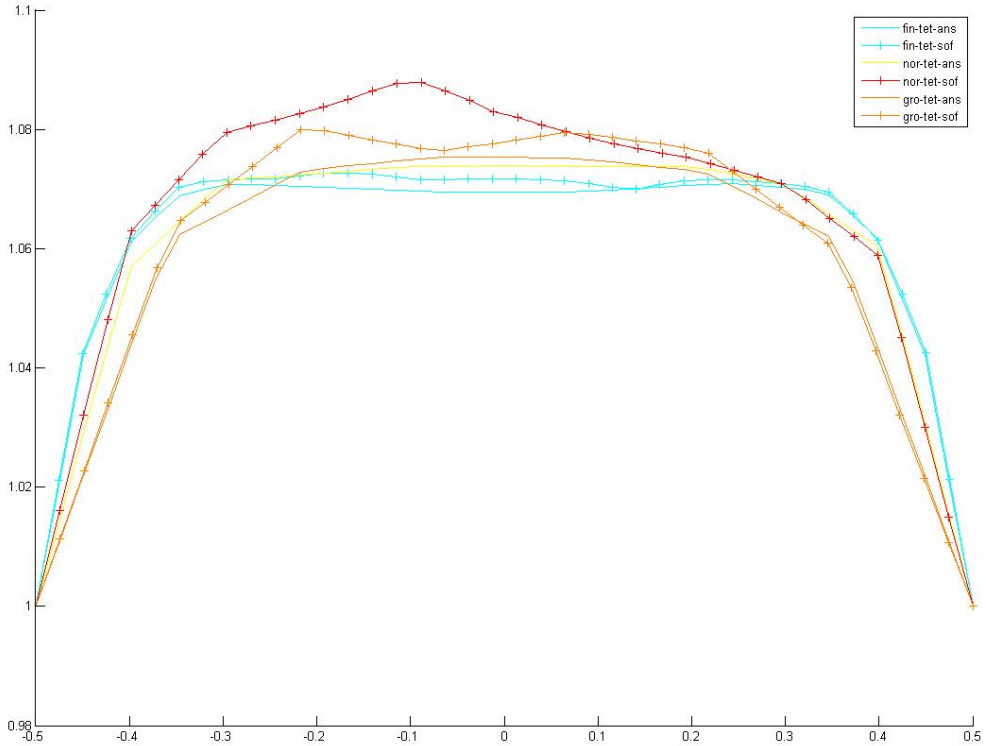


Fig21 : Cylindre l= 28m, r=5m, E=15000 Pa, poisson = 0.3.
Résultats en grande déformation de Truth Cylinder contraints à 20 %.
Maillages automatiques, générés par Matlab (fig)

F.Conclusion

L'étude des différentes simulations, tant dans Sofa que dans Ansys, nous permet de tirer quelques connaissances utiles quant au fonctionnement de Sofa.

La première observation, remarquée dans presque tous les cas, est que les maillages Sofa (tétraédrique ou hexaédriques tessélés) et Ansys en tétraèdres linéaires donnent des résultats similaires, tant en petite qu'en grande déformation. Ces résultats ne sont cependant pas très satisfaisants, étant données les grandes différences que l'on peut observer entre deux finesses de maillages différentes. Les résultats avec des finesses de maillages importantes sont tout de même assez proches des courbes théoriques pour être « visuellement » justes, ce qui, à priori, est le but recherché.

On constate que les simulations de poutres cylindriques sont, dans Ansys, moins fiables que les simulations de poutres rectangulaires qui, avec des maillages assez fins, fournissent des résultats satisfaisants.
Dans certains cas, ces cylindres, n'étant pas maillés de façon totalement symétrique, sont soumis à des couples de torsion internes issues de la modélisation numérique, et on observera alors un vrillage non désiré et parfois important de l'objet. Les mêmes simulations maillées de façon non régulières sont souvent pires, n'ayants pas alors de contours parfaitement continus.

Certains points, bien que non vitaux, peuvent être utiles et rapidement développables : il pourrait en effet être relativement pratique de pouvoir définir des « totalMass »,cf. partie D, et également, à l'aide d'un ou plusieurs critères de convergence, de pouvoir stopper et sauvegarder les résultats d'une simulation.

Je pense qu'il serait intéressant à plus long terme de pouvoir faire des calculs Sofa avec des hexaèdres directement, étant donné leurs bonnes performances dans Ansys, avec des éléments linéaires simples, et la forte ressemblance des résultats Ansys et Sofa en tétraèdres linéaires.