

WDNP101 – Sollicitation sismique d'une construction par couches avec loi de Hujeux

Résumé :

Ce cas test complète la modélisation numérique d'une colonne unidimensionnelle de sol dont on a déjà décrit la modélisation de la pose successive des couches avec des éléments volumiques dans le cas test WTNV132, en prenant en compte à la fois le couplage hydromécanique et la plastification du sol due à son comportement non-linéaire (par la loi de Hujeux). Ici on enchaîne sur un modèle d'éléments plans la réponse dynamique à une sollicitation sismique en continuité de l'étape initiale de pose calculée en statique.

On considère ici 5 modélisations : la première pour une et la seconde pour une résolution dynamique.

- dans la modélisation A, on utilise la modélisation hydromécanique standard `D_PLAN_HM` . La résolution dynamique est effectuée sur base modale de projection avec schéma en temps explicite ;
- dans la modélisation B, on utilise la modélisation hydromécanique standard `D_PLAN_HM` . La résolution dynamique est effectuée sur base physique avec schéma en temps implicite. Le shift de la masse n'est pas activé ;
- dans la modélisation C, on utilise la modélisation hydromécanique sous-intégrée `D_PLAN_HM_SI` . Le problème hydromécanique est adimensionné. La résolution dynamique est effectuée sur base physique avec schéma en temps implicite sans shift de la masse ;
- dans la modélisation D, on réalise le passage tridimensionnel de la modélisation C. On utilise la modélisation hydromécanique sous-intégrée `3D_HM_SI` . La résolution dynamique est effectuée sur base physique avec schéma en temps implicite sans shift de la masse ;
 - dans la modélisation E, on utilise la modélisation hydromécanique standard `D_PLAN_HM` . La résolution dynamique est effectuée sur base physique avec schéma en temps explicite. Le shift de la masse est activé

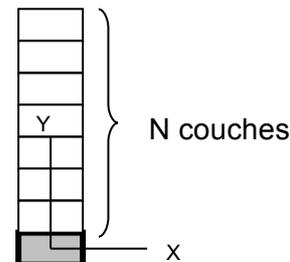
1 Problème de référence

1.1 Géométrie

Le modèle est constitué $N+1$ éléments au total : il s'agit de poser N couches de sol ($N=10$ dans le cas-test) sur un substratum élastique poreux infiniment rigide représenté par une 0^{ème} couche.

Chaque couche est constituée d'un élément de maillage (quadratique), d'une hauteur de 2 m chacune. La colonne de sol une fois construite mesure donc 20 m au total.

Par principe, le problème est bidimensionnel (les déformations planes se produisent dans un plan vertical) : en effet, on se place dans l'hypothèse d'une invariance du sol par translation horizontale, ce qui impose que les déformations mécaniques et les flux hydrauliques soient nuls dans la direction horizontale (modèle œdométrique).



1.2 Propriétés de matériaux

Les propriétés élastiques, anélastiques et hydrauliques des couches sont données ci-après :

	Paramètres	Valeurs
Propriétés élastiques	E (pour le substratum, on prend $5 \times E$)	1000 MPa
	ν	0.3
	densité homogénéisée : ρ_h	2105 kg/m ³
Propriétés Hujeux	n	0.89
	d	1.7
	b	1
	dilatance : α	1
	angle de frottement : φ	21 °
	angle de dilatance : ψ	21 °
	pression critique : P_{co}	250 kPa
	pression de référence : P_{ref}	1 MPa
	a_{mon}	0.005
	a_{cyc}	0.003
	c_{mon}	0.18
	c_{cyc}	0.10
	rayon élastique dév. monotone	0.025
	rayon élastique iso. monotone	0.01
	rayon élastique dév. cyclique	0.025
	rayon élastique iso. cyclique	0.01
	r_{hys}	0.1
r_{mob}	0.5	
x_m	2	

Propriétés hydrauliques	porosité : ϕ	0.35
	densité de l'eau : ρ_e	1000 kg/m^3
	coefficient de Biot : B	1
	inverse de la compressibilité de l'eau : K^{-1}	$5.E^{-10}$
	conductivité intrinsèque : K_{int}	10^{-12}
	viscosité : ν	10^{-3}
	dépendance de ν par rapport à la température : $D\nu/DT$	0

1.3 Conditions aux limites et chargements

1.3.1 Pour l'étape statique de pose

Dans le modèle considéré, les conditions limites s'appliquent aux $n+1$ couches présentes à l'étape n de calcul. Elles sont les mêmes que pour un oedomètre (la colonne de sol est un échantillon d'un espace infini par translation horizontale) :

- Les conditions d'invariance horizontale :
 - $u_x = 0$ sur les mailles latérales ;
- Une condition de blocage de la 0^{ème} couche rigide :
 - $u_y = 0$ sur la maille du bas ;
- Une condition de pression hydraulique nulle à la surface libre de la colonne :
 - $PRE1 = 0$ sur la maille du dessus de la $n+1$ ^{ème} couche (la dernière posée) ;
- Un état de contrainte initial non nul dans chaque couche posée, à cause de la répulsion de la loi de Hujieux pour des états de contraintes proches de 0 :
 - $\sigma_0 = -20.10^{+3} \text{ Pa}$ dans la $n+1$ ^{ème} couche (la dernière posée) ;
- Les conditions de chargement :
 - l'ensemble de la colonne est soumis à la pesanteur ;

La construction de la colonne s'effectue en respectant un laps de temps $\Delta t = 10^{+6} \text{ s}$ entre le début de l'étape n et celui de l'étape $n+1$. Durant ce laps de temps, il y a diffusion du fluide et consolidation de la colonne sous l'effet de son propre poids (tassement). Il est important de veiller à ce que ce laps de temps soit suffisant, en le mettant en rapport avec la valeur de perméabilité du matériau poreux¹. Notamment, le produit de Δt avec cette perméabilité donne une distance de diffusion du fluide qui doit être suffisante (ici de l'ordre de 10 m) par rapport à la dimension de la colonne (20 m de hauteur).

	Éléments du modèle	Valeurs
Conditions aux limites	BAS	$DY = 0$; flux nul
	FACES LATÉRALES	$DX = 0$; flux nul
	HAUT	$PRE1 = 0$
	Confinement initial du sol	$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \sigma_0 = 20 \text{ kPa}$
Chargement	TOUT	Pesanteur : $g = -9.81 \text{ m/s}^2$

1 On calcule d'abord la conductivité du fluide à partir de la conductivité intrinsèque :

$$\lambda = \frac{K^{int}}{\nu} = 10^{-9} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^3 \text{ s} ; \text{ ce qui donne finalement pour la perméabilité du matériau poreux :}$$

$$K = \rho_e \times g \times \lambda = 9.81 \times 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$$

1.3.2 Pour l'étape dynamique de sollicitation sismique

Au cours de cette étape, les conditions limites de chargement sont globalement les mêmes que celles de l'étape statique. La différence vient de ce que les conditions limites de blocage sur les faces latérales sont remplacées par une condition de périodicité obtenue en rendant égaux les déplacements des nœuds des faces gauche et droite en vis-à-vis. On représente cette condition au moyen du mot clé `LIAISON_GROUP` de `AFFE_CHAR_MECA` reliant les composantes de déplacement mécanique 'DX' et 'DY' des faces latérales gauche (groupée dans 'LAT_LEFT') et droite (groupée dans 'LAT_RIGHT').

La maille du bas (groupe 'BAS') n'est plus bloquée dans la direction X car on y affecte un élément de frontière absorbante de modélisation `D_PLAN_ABSO` à effet amortisseur en dynamique.

Dès la fin de la phase de pose des couches, on soumet la colonne en plus de la pesanteur verticale à une accélération imposée horizontale mono-appui équivalente à une pesanteur dans la direction X pondérée par une excitation normée à $0.15g$ sur un intervalle de temps de 10 secondes. Le signal est échantillonné à $\Delta t = 10^{-2} s$.

Cette excitation est représentée sur la figure ci-dessous.

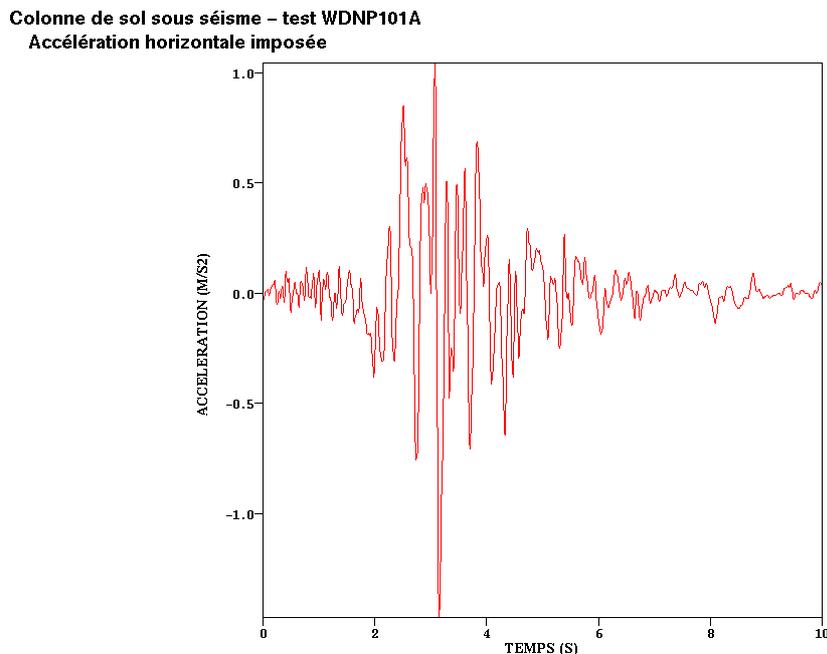


Figure 1.3-a : Accélération horizontale imposée à la base de la colonne.

1.4 Déroulement du calcul statique

On utilise la méthode **multi-modèle** pour réaliser le calcul de cette phase. A chaque étape $n+1$ de la pose, on associe un modèle contenant strictement les $n+1$ couches posées. Les états de contrainte, de déplacement et des variables internes à l'issue de l'étape précédente sont transférées à l'étape suivante par des opérations de transfert de champs. Le champ de déplacement initial de la couche de sol posée doit varier linéairement de bas en haut, il varie en effet entre la valeur du tassement des couches inférieures et la côte géométrique à respecter, associée à un déplacement initial nul.

1.5 Déroulement du calcul dynamique

On part du modèle obtenu en fin de la phase statique de pose de couche. Puis on recalcule un nouveau résultat à partir du dernier état statique obtenu en fin de pose afin de retrouver les mêmes déplacements, contraintes, variables internes mais avec le remplacement des conditions de blocage horizontal des bords latéraux par une condition de solidarisation des nœuds en vis-à-vis. L'enchaînement du calcul dynamique avec ses chargements supplémentaires et ses nouvelles conditions limites se fera donc avec ce même nom de résultat avec l'échelle de temps de la durée du calcul dynamique, soit des instants variant entre 0 et 10 secondes au maximum.

Par souci de limiter la durée du cas-test, on se restreint à 4 secondes de signal.

1.6 Redimensionnement du problème hydromécanique

Pour la modélisation C, le problème hydromécanique est redimensionné avec les valeurs suivantes :

$$P_0 = 10^{+7} \text{ et } K_0 = 10^{-5}$$

où P_0 sert à redimensionner l'unité des contraintes et K_0 celle des masses, conformément à la documentation **U2.04.08**.

1.7 Résultats de référence

1.7.1 Calcul de référence générale

On utilise comme cas de référence général pour les quatre modélisations un calcul :

- réalisé avec la modélisation `D_PLAN_HM` ;
- redimensionné comme indiqué au paragraphe §1.6 ;
- utilisant un maillage cinq fois plus fin (5 mailles par couches au lieu d'une seule) ;
- avec `RESI_GLOB_RELA` = 10^{-6} ;
- avec $\Delta t = 10^{-3} \text{ s}$;

Ce calcul peut être considéré comme le plus exact.

1.7.2 Tests de validation

3 `TEST_RESU` portent d'abord sur les maxima d'accélération horizontale absolue calculée au nœud sommet de la colonne de sol. L'accélération absolue est obtenue par sommation de l'accélération relative provenant du calcul et de l'accélération d'entraînement décrite au §1.3.2 .

On retient en particulier les valeurs RMS de l'accélération horizontale absolue dans les intervalles autour de maxima identifiés comme intéressants, soient dans les intervalles $RMS \in [2,80 - 2,88]$, $[3,06 - 3,14]$ et $[3,47 - 3,55]$.

1 `TEST_RESU` porte sur le spectre de réponse en accélération (SRO) calculé à un taux d'amortissement de 2%. On teste l'amplitude duc pic principal situé à $f = 2,5 \text{ Hz}$.

Enfin, 4 `TEST_RESU` portent sur le maximum de la différence en valeur absolue entre la solution temporelle calculée au milieu de la colonne ($Y = 10 \text{ m}$) et celle de référence au même point. Les grandeurs suivantes sont comparées :

- déplacement horizontal. La différence est normée par le maximum de déplacement $DX = 0,015 \text{ m}$;
- vitesse horizontale. La différence est normée par le maximum de vitesse $VX = 0,125 \text{ m.s}^{-1}$;
- pression hydraulique. La différence est normée par le maximum de variation de pression hydraulique $PREI = 2 \times 10^{+4} \text{ Pa}$;
- contrainte effective de cisaillement. La différence est normée par le maximum de contrainte effective de cisaillement $SIXY = 2 \times 10^{+4} \text{ Pa}$;

2 Modélisation A

2.1 Caractéristiques de la modélisation

La modélisation A est *plane*. Chaque couche est représentée par un élément QUAD8. On utilise une modélisation : (MODELISATION = 'D_PLAN_HM').

2.2 Calcul de la réponse à la sollicitation sismique

Le calcul de la réponse à la sollicitation sismique s'opère sur une durée de 4 secondes suffisante pour l'obtention des principaux maxima. Le pas de temps du calcul est de 0.001 seconde soit 4000 pas calculés et 400 pas archivés par pas de 0.01 seconde.

2.3 Méthode de calcul dynamique

Pour le calcul dynamique, on utilise une méthode explicite de résolution sur base modale de projection afin de réduire le pas de calcul à des proportions raisonnables. Pour le schéma explicite de Tchamwa-Wielgosz de paramètre PHI valant 1.10, cela implique de calculer une base modale tronquée à environ 68 Hertz pour permettre la convergence en satisfaisant la condition CFL avec le pas de temps de calcul de 0.001 seconde. Cette base modale est calculée à partir de la matrice de rigidité tangente obtenue en fin de pose statique des couches avec l'opérateur CALCUL. On introduit également un amortissement modal équivalent à de l'amortissement de Rayleigh avec $\alpha = 7.E-5$ complétant l'amortissement numérique du schéma explicite de Tchamwa-Wielgosz.

2.4 Fonctionnalités testées

Dans l'intégration des équations d'équilibre en statique, on demande ainsi une réactualisation de la matrice tangente, laquelle est fournie par les routines de la loi de Hujeux et accélère sensiblement la convergence. On demande également la subdivision du pas de temps aussi bien en statique qu'en dynamique pour traiter les situations d'échec de l'intégration locale dues à des incréments de chargement trop grand. *Cette fonctionnalité est grandement recommandée.*

La prise en compte de la partie dynamique nécessite au préalable le calcul de la matrice tangente à partir de la commande CALCUL qui utilise les mêmes arguments que le calcul statique de la pose de la dernière couche. Ensuite, il est nécessaire de calculer une base modale par bandes de fréquences jusqu'à 68 Hertz au moyen de la commande CALC_MODES avec l'option 'BANDE' découpée en plusieurs sous-bandes. Cette base modale sera ensuite utilisée comme espace de projection de la résolution du problème dynamique au moyen de l'opérateur DYNA_NON_LINE avec une méthode explicite.

2.5 Grandeurs et résultats testés de la modélisation A

2.5.1 Valeurs RMS de l'accélération horizontale sommitale

Identification	Autre Aster	Tolérance
$RMS \in [2,80 - 2,88]$	1.862863 m/s^2	2,0%
$RMS \in [3,06 - 3,14]$	1.107501 m/s^2	20,0%
$RMS \in [3,47 - 3,55]$	2.409709 m/s^2	10,0%

2.5.2 Amplitude du premier pic de la courbe SRO à 2% d'amortissement

Identification	Autre Aster	Tolérance
$f = 2,5 \text{ Hertz}$	$0,87985856 \text{ m/s}^2$	1,00%

2.5.3 Écart maximal sur les transitoires

Évaluation du maximum de l'écart au cours du temps entre la solution calculée et la solution de référence (calcul D_PLAN_HM adimensionné avec un maillage raffiné). Cette évaluation est effectuée au milieu de la colonne à la cote $Y = 10 \text{ m}$ (nœud $N7$).

Identification	Tolérance
$\frac{\text{Max}_{t \in [0,4]} DX - DX^{ref} }{\text{Max}_{t \in [0,4]} DX^{ref} }$	25,0%
$\frac{\text{Max}_{t \in [0,4]} VX - VX^{ref} }{\text{Max}_{t \in [0,4]} VX^{ref} }$	5,0%
$\frac{\text{Max}_{t \in [0,4]} PREI - PREI^{ref} }{\text{Max}_{t \in [0,4]} PREI^{ref} - PREI^{ref}_{t=0} }$	120,0%
$\frac{\text{Max}_{t \in [0,4]} SIXY - SIXY^{ref} }{\text{Max}_{t \in [0,4]} SIXY^{ref} }$	25,0%

L'ensemble des valeurs présentées sont également testées en non-régression pour des niveaux de tolérance bien plus stricts ($5e-4$ %).

2.6 Commentaires sur les résultats

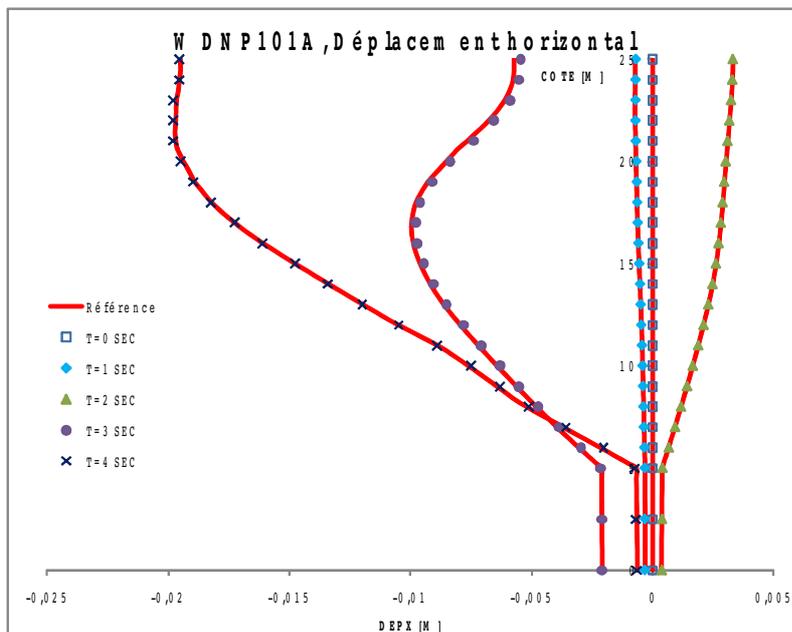


Figure 3.2-a : Répartition du déplacement horizontal le long de la colonne, pour t = 0, 1, 2, 3 et 4 sec. Comparaison avec la solution de référence

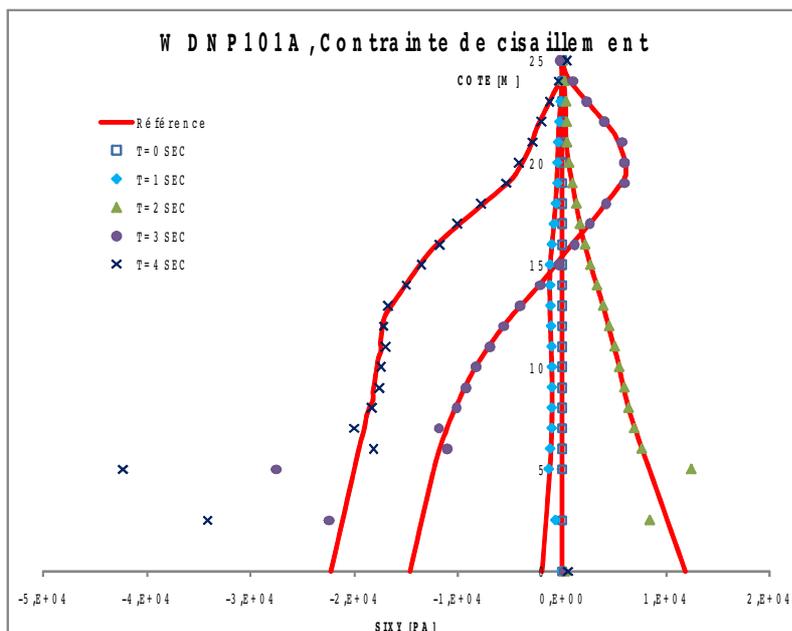


Figure 3.2-b : Répartition de la contrainte de cisaillement le long de la colonne, pour t = 0, 1, 2, 3 et 4 sec. Comparaison avec la solution de référence

La méthode de projection sur base modale est la plus rapide, mais représente de manière approximative la physique du problème. En particulier, l'évolution de la pression hydraulique n'est pas captée, car ce degré de liberté n'apparaît pas dans la base modale de projection (voir §10).

3 Modélisation B

3.1 Caractéristiques de la modélisation

La modélisation B est *plane* . Chaque couche est représentée par un élément QUAD8. On utilise une modélisation : (MODELISATION = 'D_PLAN_HM') .

3.2 Calcul de la réponse à la sollicitation sismique

Le calcul de la réponse à la sollicitation sismique s'opère sur une durée de 4 secondes suffisante pour l'obtention des principaux maxima. Le pas de temps du calcul est de 0.001 seconde, soit 4000 pas calculés et 400 pas archivés par pas de 0.01 seconde.

3.3 Méthode de calcul dynamique

Pour le calcul dynamique, on utilise une méthode implicite de résolution sur base physique avec le schéma HHT de paramètre ALPHA valant -0.17 créant le même amortissement numérique que le schéma explicite de Tchamwa-Wielgosz avec le paramètre PHI valant 1.17 dans le cas équivalent à la modélisation A pour le même pas de temps de calcul de 0.001 seconde.

Pour assurer la convergence à chaque pas de temps, on utilise le solveur MUMPS .

Le critère de convergence est fixé à RESI_GLOB_RELA = 10^{-4} avec ITER_GLOB_MAXI = 10.

On autorise un redécoupage uniforme du pas de temps par 2, sur 20 niveaux.

3.4 Fonctionnalités testées

Dans l'intégration des équations d'équilibre en statique (et pour cette modélisation également en dynamique), on demande ainsi une réactualisation de la matrice tangente, laquelle est fournie par les routines de la loi de Hujeux et accélère sensiblement la convergence. On demande également la subdivision du pas de temps aussi bien en statique qu'en dynamique pour traiter les situations d'échec de l'intégration locale dues à des incréments de chargement trop grand. *Cette fonctionnalité est grandement recommandée* .

La prise en compte de la partie dynamique ne nécessite plus au préalable le calcul de la matrice tangente à partir de la commande CALCUL ni un calcul de base modale. On procède ensuite directement à la résolution du problème dynamique au moyen de l'opérateur DYNA_NON_LINE avec une méthode implicite.

Cette modélisation représente, avec la modélisation C, l'une des deux modélisations standard pour la simulation dynamique d'un milieu hydromécanique couplé.

3.5 Grandeurs et résultats testés de la modélisation B

3.5.1 Valeurs RMS de l'accélération horizontale sommitale

Identification	Autre Aster	Tolérance
$RMS \in [2,80 - 2,88]$	1.862863 m/s^2	5,00%
$RMS \in [3,06 - 3,14]$	1.107501 m/s^2	20,00%
$RMS \in [3,47 - 3,55]$	2.409709 m/s^2	10,0%

3.5.2 Amplitude du premier pic de la courbe SRO à 2% d'amortissement

Identification	Autre Aster	Tolérance
$f = 2,5$ Hertz	0,87985856 m/s^2	3,0%

3.5.3 Écart maximal sur les transitoires

Évaluation du maximum de l'écart au cours du temps entre la solution calculée et la solution de référence (calcul D_PLAN_HM adimensionné avec un maillage raffiné – voir §1.7.1). Cette évaluation est effectuée au milieu de la colonne à la cote $Y = 10\text{ m}$ (nœud N7).

Identification	Tolérance
$\frac{\text{Max}_{t \in [0,4]} DX - DX^{ref} }{\text{Max}_{t \in [0,4]} DX^{ref} }$	25,0%
$\frac{\text{Max}_{t \in [0,4]} VX - VX^{ref} }{\text{Max}_{t \in [0,4]} VX^{ref} }$	5,0%
$\frac{\text{Max}_{t \in [0,4]} PREI - PREI^{ref} }{\text{Max}_{t \in [0,4]} PREI^{ref} - PREI_{t=0}^{ref} }$	10,0%
$\frac{\text{Max}_{t \in [0,4]} SIXY - SIXY^{ref} }{\text{Max}_{t \in [0,4]} SIXY^{ref} }$	25,0%

L'ensemble des valeurs présentées sont également testées en non-régression pour des niveaux de tolérance plus stricts (0,2 %).

3.6 Commentaires sur les résultats

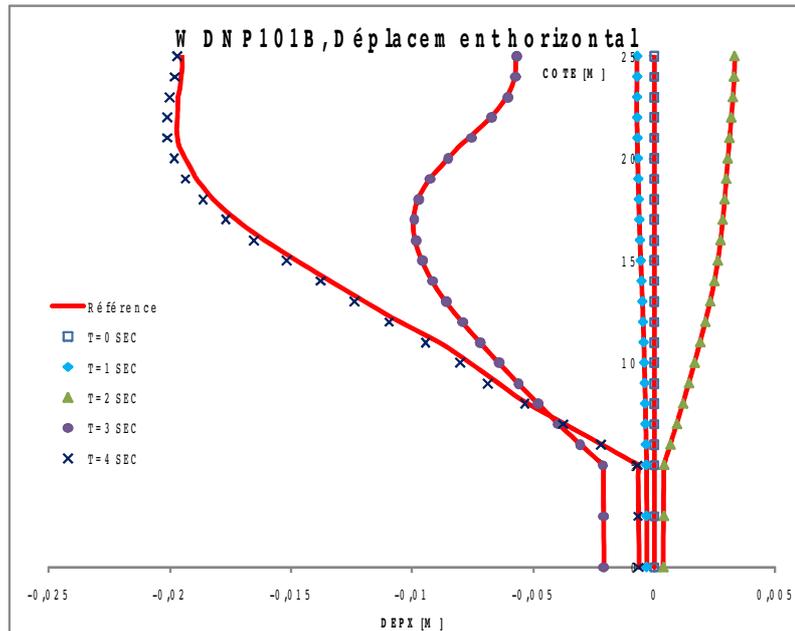


Figure 5.2-a : Répartition du déplacement horizontal le long de la colonne, pour $t = 0, 1, 2, 3$ et 4 sec. Comparaison avec la solution de référence

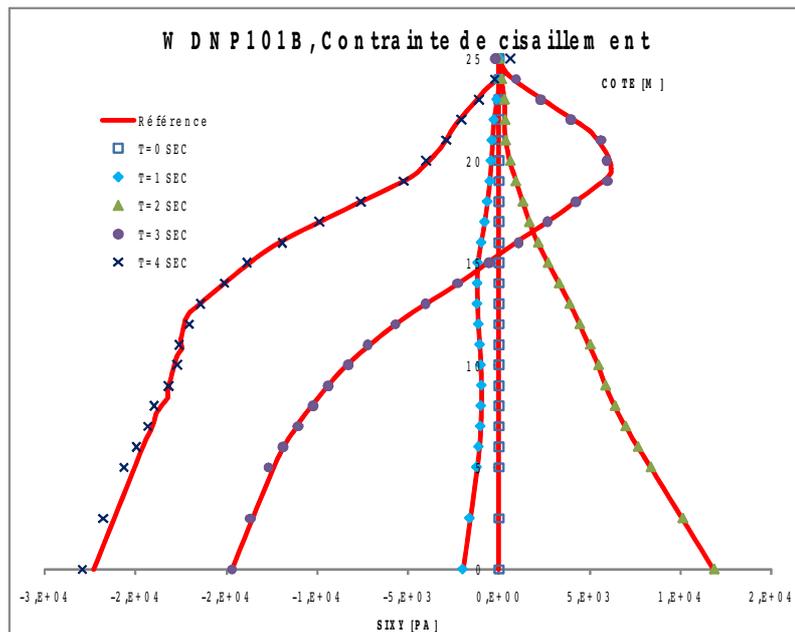


Figure 5.2-b : Répartition de la contrainte de cisaillement le long de la colonne, pour $t = 0, 1, 2, 3$ et 4 sec. Comparaison avec la solution de référence

4 Modélisation C

4.1 Caractéristiques de la modélisation

La modélisation C est *plane*. Chaque couche est représentée par un élément QUAD8. On utilise une modélisation sous-intégrée (MODELISATION = 'D_PLAN_HM_SI'). Le problème hydromécanique est adimensionné avec les valeurs indiquées au paragraphe §1.7.1.

4.2 Calcul de la réponse à la sollicitation sismique

Le calcul de la réponse à la sollicitation sismique s'opère sur une durée de 4 secondes suffisante pour l'obtention des principaux maxima. Le pas de temps du calcul est de 0.001 seconde soit 4000 pas calculés.

4.3 Méthode de calcul dynamique

Pour le calcul dynamique, on utilise une méthode implicite de résolution sur base physique avec le schéma HHT de paramètre ALPHA valant -0.17 créant une certaine quantité d'amortissement numérique.

Pour assurer la convergence à chaque pas de temps, on utilise le solveur MULT_FRONT.

Le critère de convergence est fixé à RESI_GLOB_RELA = 10^{-6} avec ITER_GLOB_MAXI = 10.

On autorise un redécoupage uniforme du pas de temps par 2, sur 20 niveaux.

4.4 Fonctionnalités testées

Dans l'intégration des équations d'équilibre en statique (et pour cette modélisation également en dynamique), on demande ainsi une réactualisation de la matrice tangente, laquelle est fournie par les routines de la loi de Hujeux et accélère sensiblement la convergence. On demande également la subdivision du pas de temps aussi bien en statique qu'en dynamique pour traiter les situations d'échec de l'intégration locale dues à des incréments de chargement trop grand. *Cette fonctionnalité est grandement recommandée.*

La résolution du problème dynamique au moyen de l'opérateur DYNA_NON_LINE est implicite.

Cette modélisation représente, avec la modélisation B, l'une des deux modélisations standard pour la simulation dynamique d'un milieu hydromécanique couplé.

4.5 Grandeurs et Résultats de la modélisation C

4.5.1 Valeurs RMS de l'accélération horizontale sommitale

Identification	Autre Aster	Tolérance
$RMS \in [2,80 - 2,88]$	1.862863 m/s^2	4,00%
$RMS \in [3,06 - 3,14]$	1.107501 m/s^2	24,00%
$RMS \in [3,47 - 3,55]$	2.409709 m/s^2	8,00%

4.5.2 Amplitude du premier pic de la courbe SRO à 2% d'amortissement

Identification	Autre Aster	Tolérance
$f = 2,5 \text{ Hertz}$	$0,87985856 \text{ m/s}^2$	2,00%

4.5.3 Écart maximal sur les transitoires

Évaluation du maximum de l'écart au cours du temps entre la solution calculée et la solution de référence (calcul D_PLAN_HM adimensionné avec un maillage raffiné – voir §1.7.1). Cette évaluation est effectuée au milieu de la colonne à la cote $Y = 10 \text{ m}$ (nœud N7).

Identification	Tolérance
$\frac{\text{Max}_{t \in [0,4]} DX - DX^{ref} }{\text{Max}_{t \in [0,4]} DX^{ref} }$	25,0%
$\frac{\text{Max}_{t \in [0,4]} VX - VX^{ref} }{\text{Max}_{t \in [0,4]} VX^{ref} }$	5,0%
$\frac{\text{Max}_{t \in [0,4]} PREI - PREI^{ref} }{\text{Max}_{t \in [0,4]} PREI^{ref} - PREI_{t=0}^{ref} }$	10,0%
$\frac{\text{Max}_{t \in [0,4]} SIXY - SIXY^{ref} }{\text{Max}_{t \in [0,4]} SIXY^{ref} }$	25,0%

L'ensemble des valeurs présentées sont également testées en non-régression pour des niveaux de tolérance plus stricts ($1e-4$ %).

4.6 Commentaires sur les résultats

Sur la Figure 7.2-a, on compare l'évolution du temps CPU au cours du calcul pour les modélisations HM et HM_SI, avec et sans adimensionnement. On voit que :

- avec ou sans adimensionnement, la sous-intégration permet de passer d'un calcul de grosso modo 650 secondes à 400 secondes ;
- l'adimensionnement du problème donne une évolution du temps CPU plus linéaire ;

Sur la Figure 7.2-b, on compare l'évolution du nombre cumulé d'itérations de Newton au cours du calcul pour les modélisations HM et HM_SI, avec et sans adimensionnement. On voit que :

- avec ou sans adimensionnement, la sous-intégration ne change pas le nombre d'itérations de Newton. Le gain en temps CPU permis par la sous-intégration est lié à un moindre nombre de résolutions élémentaires aux points de Gauss ;
- l'adimensionnement réduit le nombre d'itérations de Newton nécessaire ;

Sur les Figures 7.2-c et 7.2-d , on compare l'évolution des forces nodales mécaniques (évaluées à partir des contraintes) au cours du calcul pour les modélisations HM et HM_SI, avec (Figure 7.2-c) et sans adimensionnement (Figure 7.2-d). L'adimensionnement permet de passer de valeurs de $3 \times 10^{+5}$ (Pa) à 3×10^{-2} (10MPa).

De même, sur les Figures 7.2-e et 7.2-f , on compare l'évolution des forces nodales hydrauliques (évaluées à partir des flux hydrauliques) au cours du calcul pour les modélisations HM et HM_SI, avec (Figure 7.2-e) et sans adimensionnement (Figure 7.2-f). L'adimensionnement permet de passer de valeurs de 10^{-6} (kg.m⁻²) à 10^{-1} (10mg.m⁻²).

L'effet recherché de l'adimensionnement est de rééquilibrer les deux types de forces nodales pour un meilleur contrôle de la convergence hydro-mécanique, comme on peut ici le constater.

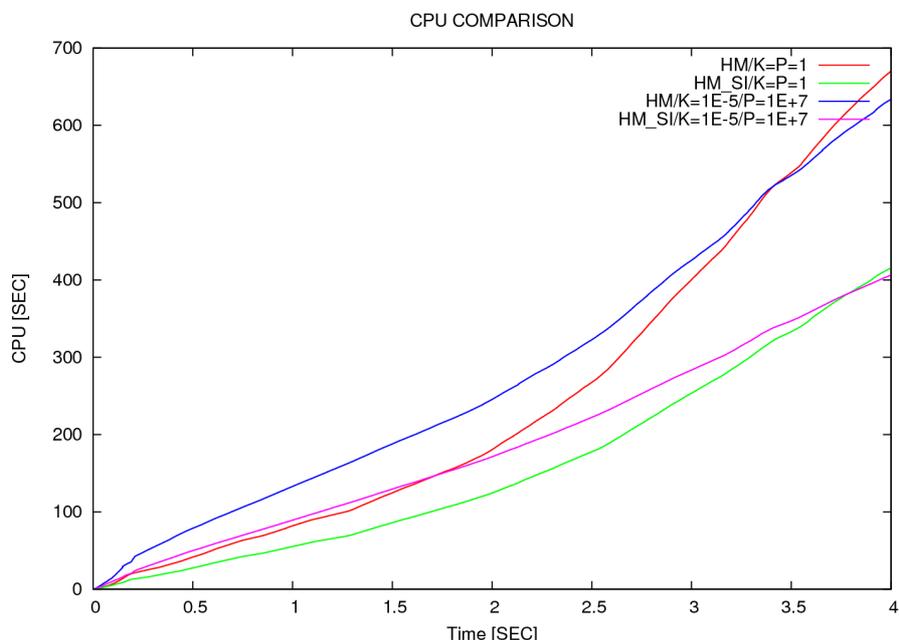


Figure 7.2-a : Comparaison des temps CPU entre les modélisations HM et HM_SI, avec et sans adimensionnement.

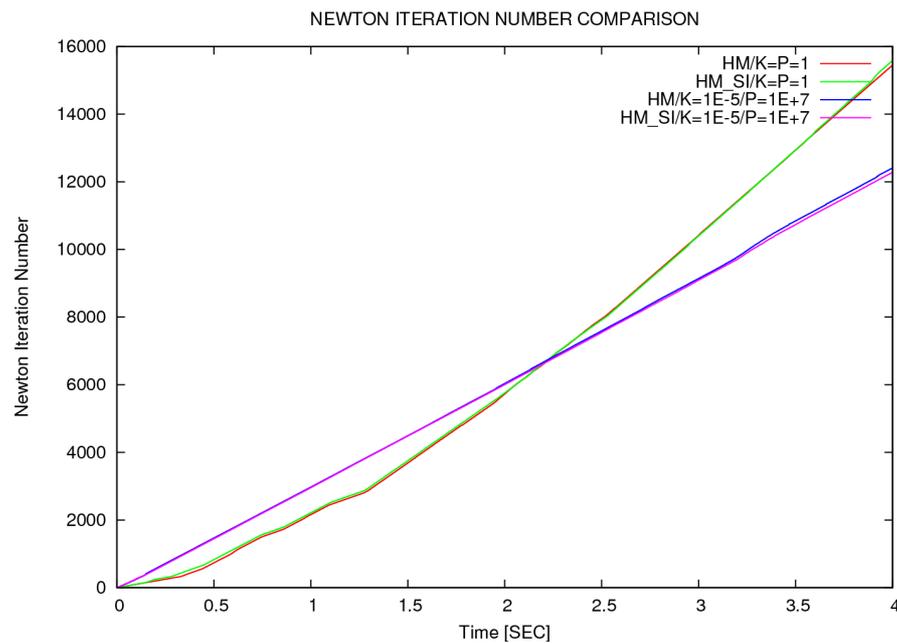


Figure 7.2-b : Comparaison du nombre d'itérations de Newton cumulé entre les modélisations HM et HM_SI, avec et sans adimensionnement.

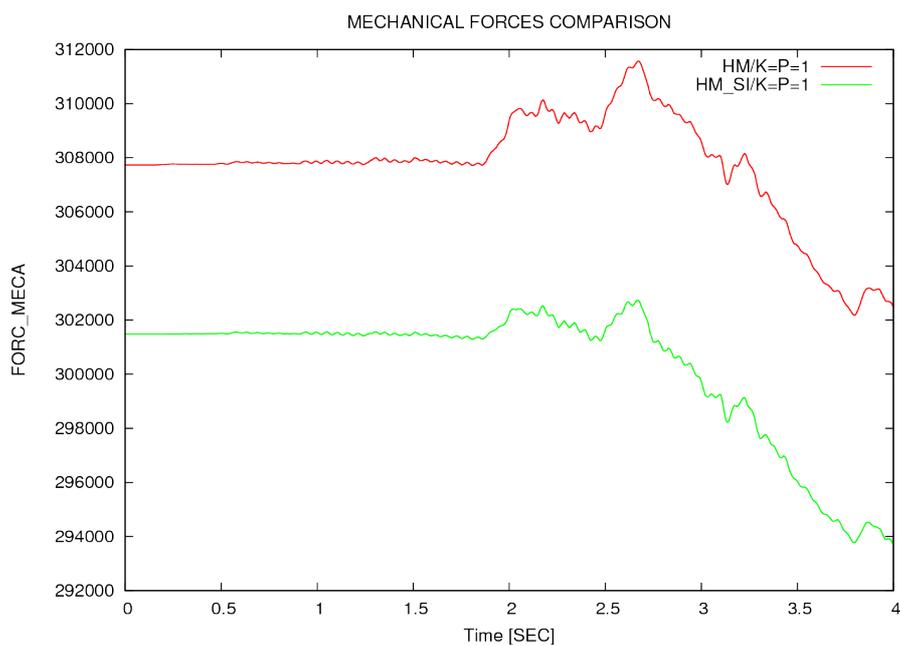


Figure 7.2-c : Comparaison des maxima de forces nodales mécaniques (estimées) entre les modélisation HM et HM_SI, sans adimensionnement.

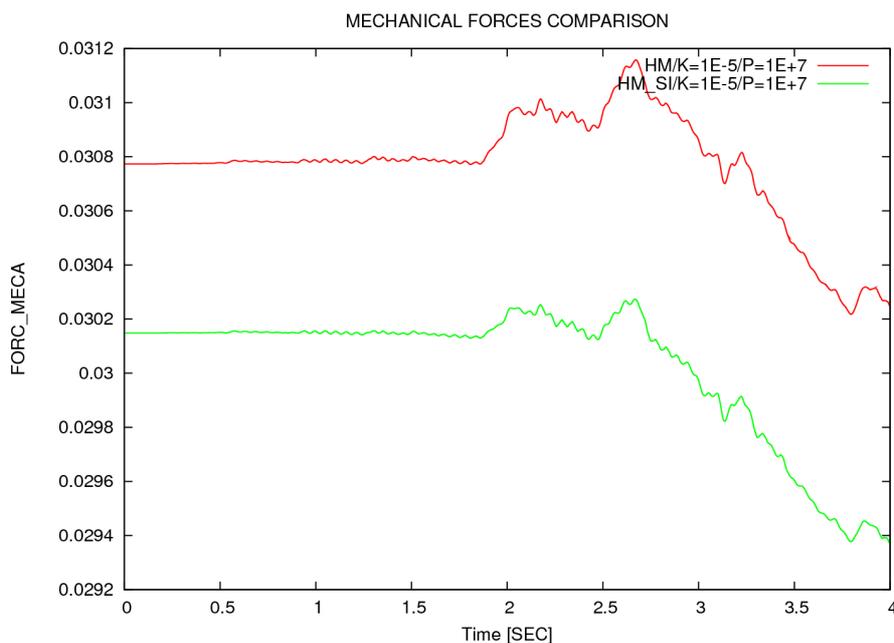


Figure 7.2-d : Comparaison des maxima de forces nodales mécaniques (estimées) entre les modélisation HM et HM_SI, avec adimensionnement.

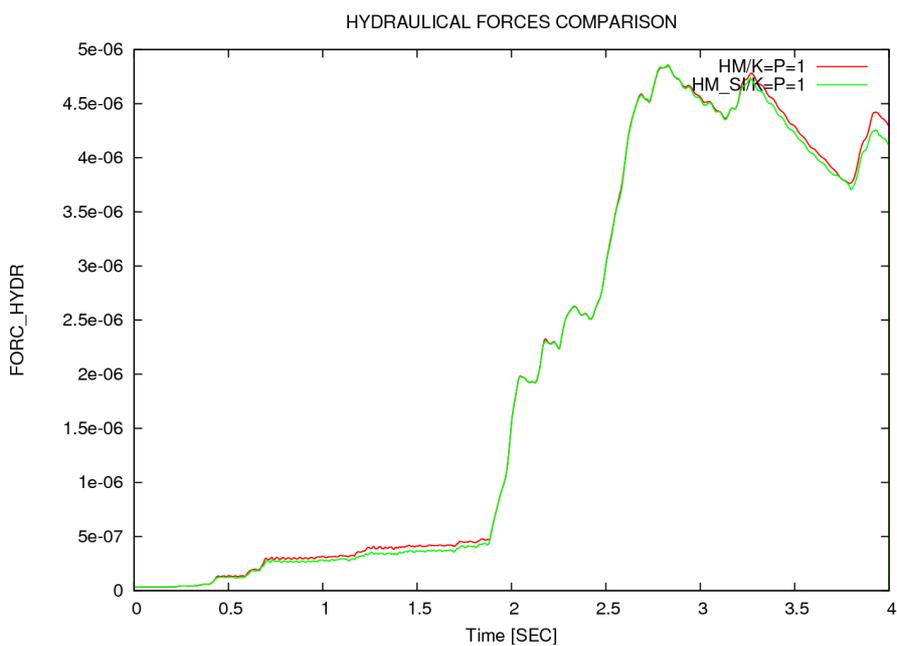


Figure 7.2-e : Comparaison des maxima de forces nodales hydrauliques (estimées) entre les modélisation HM et HM_SI, sans adimensionnement.

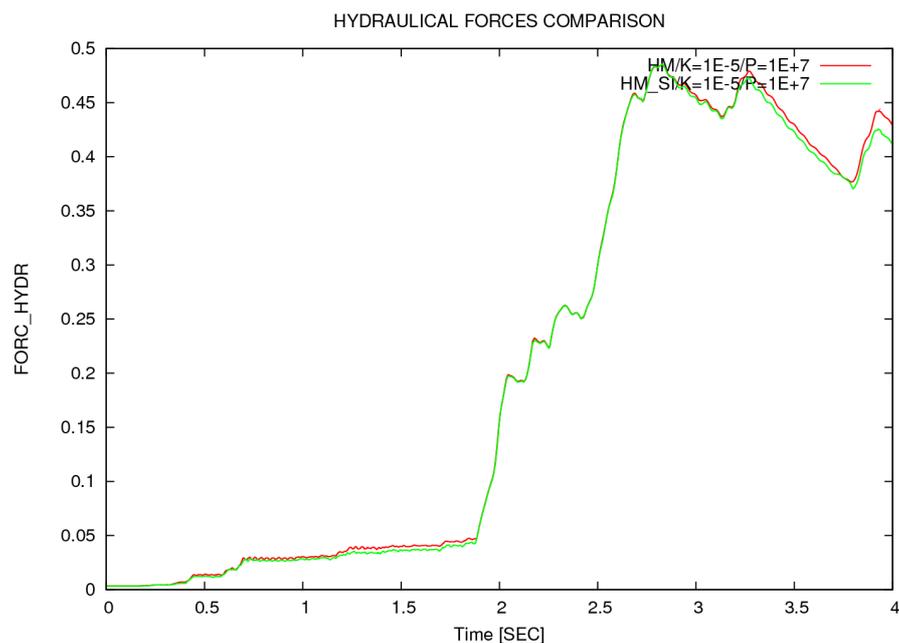


Figure 7.2-f : Comparaison des maxima de forces nodaes hydrauliques (estimées) entre les modélisation HM et HM_SI, avec adimensionnement.

5 Modélisation D

5.1 Caractéristiques de la modélisation

La modélisation D est *tridimensionnelle* . Chaque couche est représentée par un élément HEXA20. On utilise une modélisation sous-intégrée (MODELISATION = '3D_HM_SI').

5.2 Calcul de la réponse à la sollicitation sismique

Le calcul de la réponse à la sollicitation sismique s'opère sur une durée de 4 secondes suffisante pour l'obtention des principaux maxima. Le pas de temps du calcul est de 0.001 seconde soit 4000 pas calculés.

5.3 Méthode de calcul dynamique

Pour le calcul dynamique, on utilise une méthode implicite de résolution sur base physique avec le schéma HHT de paramètre ALPHA valant -0.17 créant une certaine quantité d'amortissement numérique.

Pour assurer la convergence à chaque pas de temps, on utilise le solveur MULT_FRONT .

Le critère de convergence est fixé à RESI_GLOB_RELA = 10^{-6} avec ITER_GLOB_MAXI = 10.

On autorise un redécoupage uniforme du pas de temps par 2, sur 20 niveaux.

5.4 Fonctionnalités testées

Dans l'intégration des équations d'équilibre en statique (et pour cette modélisation également en dynamique), on demande ainsi une réactualisation de la matrice tangente, laquelle est fournie par les routines de la loi de Hujeux et accélère sensiblement la convergence. On demande également la subdivision du pas de temps aussi bien en statique qu'en dynamique pour traiter les situations d'échec de l'intégration locale dues à des incréments de chargement trop grand. *Cette fonctionnalité est grandement recommandée* .

La résolution du problème dynamique au moyen de l'opérateur DYNA_NON_LINE est implicite.

5.5 Grandeurs et résultats testés de la modélisation D

5.5.1 Valeurs RMS de l'accélération horizontale sommitale

Identification	Autre Aster	Tolérance
$RMS \in [2,80 - 2,88]$	1.862863 m/s^2	4,0%
$RMS \in [3,06 - 3,14]$	1.107501 m/s^2	24,0%
$RMS \in [3,47 - 3,55]$	2.409709 m/s^2	8,0%

5.5.2 Amplitude du premier pic de la courbe SRO à 2% d'amortissement

Identification	Autre Aster	Tolérance
$f = 2,5 \text{ Hertz}$	$0,87985856 \text{ m/s}^2$	2,0%

5.5.3 Écart maximal sur les transitoires

Évaluation du maximum de l'écart au cours du temps entre la solution calculée et la solution de référence (calcul D_PLAN_HM adimensionné avec un maillage raffiné). Cette évaluation est effectuée au milieu de la colonne à la cote $Y = 10 \text{ m}$ (nœud N7).

Identification	Tolérance
$\frac{\text{Max}_{t \in [0,4]} DX - DX^{ref} }{\text{Max}_{t \in [0,4]} DX^{ref} }$	25,0%
$\frac{\text{Max}_{t \in [0,4]} VX - VX^{ref} }{\text{Max}_{t \in [0,4]} VX^{ref} }$	5,0%
$\frac{\text{Max}_{t \in [0,4]} PREI - PREI^{ref} }{\text{Max}_{t \in [0,4]} PREI^{ref} - PREI_{t=0}^{ref} }$	10,0%
$\frac{\text{Max}_{t \in [0,4]} SIXY - SIXY^{ref} }{\text{Max}_{t \in [0,4]} SIXY^{ref} }$	25,0%

L'ensemble des valeurs présentées sont également testées en non-régression pour des niveaux de tolérance plus stricts (0,01 %).

5.6 Commentaires

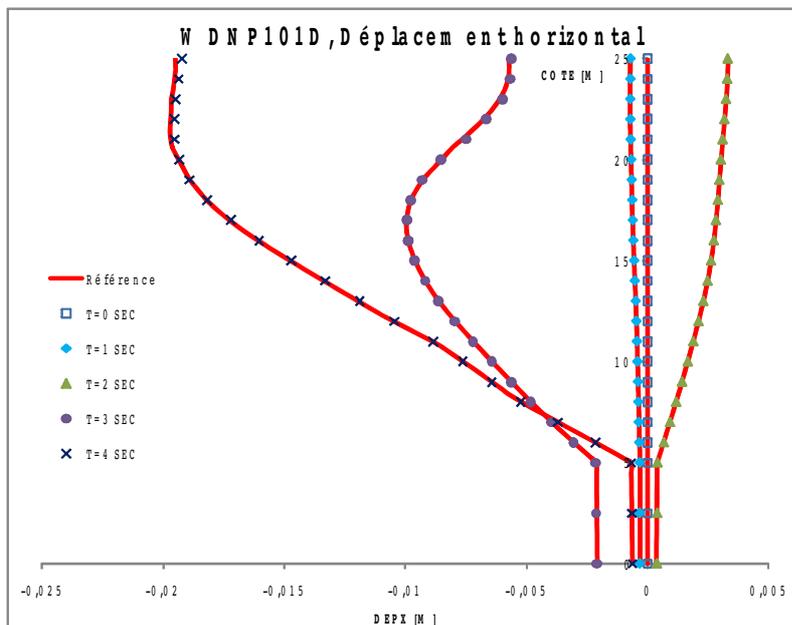


Figure 9.2-a : Répartition du déplacement horizontal le long de la colonne, pour $t = 0, 1, 2, 3$ et 4 sec. Comparaison avec la solution de référence

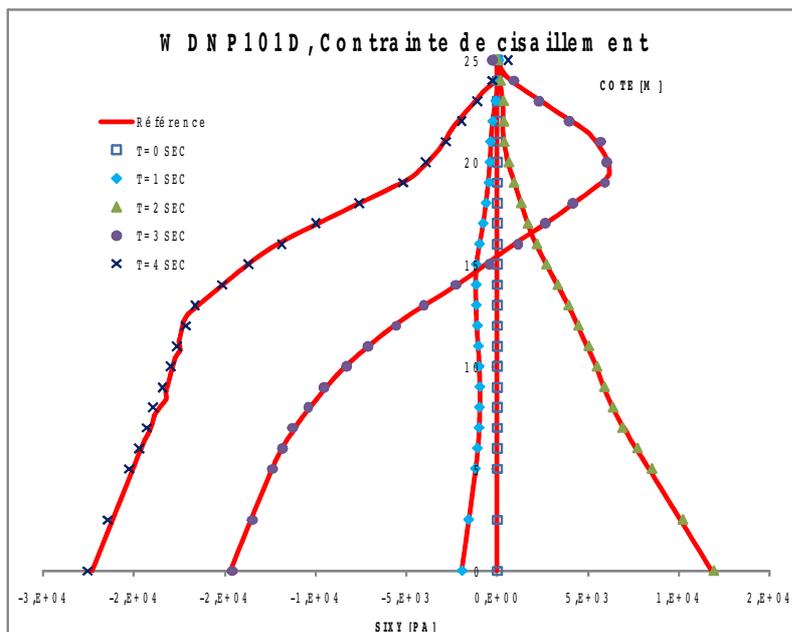


Figure 9.2-b : Répartition de la contrainte de cisaillement le long de la colonne, pour $t = 0, 1, 2, 3$ et 4 sec. Comparaison avec la solution de référence

La modélisation D, comme la modélisation C, permet d'avoir une solution coïncidente avec la solution de référence pour toutes les variables observées (voir §10).

6 Modélisation E

6.1 Caractéristiques de la modélisation

La modélisation E est *plane*. Chaque couche est représentée par un élément QUAD8. On utilise une modélisation : (MODELISATION = 'D_PLAN_HM').

6.2 Calcul de la réponse à la sollicitation sismique

Le calcul de la réponse à la sollicitation sismique s'opère sur une durée de 3 secondes suffisante pour l'obtention du premier maximum. Le pas de temps du calcul est de 0.00048 seconde, et le pas d'archivage de 0.01 seconde.

6.3 Méthode de calcul dynamique

Pour le calcul dynamique, on utilise une méthode explicite de résolution sur base physique avec schéma explicite de Tchamwa-Wielgosz de paramètre PHI valant 1.17 dans le cas équivalent à la modélisation A pour le pas de temps de calcul de 0.001 seconde.

Pour assurer la convergence à chaque pas de temps, on utilise le solveur MUMPS.

6.4 Fonctionnalités testées

Dans l'intégration des équations d'équilibre en statique, on demande ainsi une réactualisation de la matrice tangente, laquelle est fournie par les routines de la loi de Hujeux et accélère sensiblement la convergence. On demande également la subdivision du pas de temps aussi bien en statique qu'en dynamique pour traiter les situations d'échec de l'intégration locale dues à des incréments de chargement trop grand. *Cette fonctionnalité est grandement recommandée.*

Dans la prise en compte de la partie dynamique, on assure la stabilité de la résolution avec le schéma explicite en utilisant un coefficient de shift de masse de 0.00048, introduit dans le mot clé SCHEMA_TEMPS de l'opérateur DYNA_NON_LINE, afin de permettre l'utilisation d'un pas de temps nettement supérieur à celui préconisé par la condition CFL.

6.5 Grandeurs et résultats testés de la modélisation E

6.5.1 Valeurs RMS de l'accélération horizontale sommitale

Identification	Autre Aster	Tolérance
RMS ∈ [2,80 – 2,88]	1.862863 m/s ²	5,00%

6.6 Commentaires sur les résultats

Le résultat testé de premier maximum d'accélération horizontale sommitale est totalement conforme à ceux obtenus avec les autres types d'analyse différant soit par la base de résolution (modélisation A), soit par le schéma de résolution (modélisations B, C, D).

7 Synthèse des résultats des modélisations A, B, C et D

On représente dans les Figures 10-a à 10-d une comparaison par rapport à la solution de référence décrite au paragraphe §1.7.1, les évolutions de :

- accélération horizontale au sommet de la colonne (Figure 10-a) ;
- la pression hydraulique au milieu de la colonne (Figure 10-b) ;
- la contrainte de cisaillement au milieu de la colonne (Figure 10-c) ;
- SRO à 2% d'amortissement au sommet de la colonne (Figure 10-d) ;

On peut constater que :

- la modélisation A, basée sur une base modale tronquée, ne permet qu'une représentation approximative des phénomènes physiques. En particulier, l'évolution de la pression hydraulique n'est pas captée (Figure 10-b) parce que le degré de liberté de pression n'est pas représenté dans la base modale ;
- les premières fréquences du spectre de réponse (SRO) sont bien représentées pour toutes les modélisations (Figure 10-d). Il n'est pas inquiétant d'observer un certain écart avec la solution de référence sur les hautes fréquences, plus sensibles aux effets de maillage ;

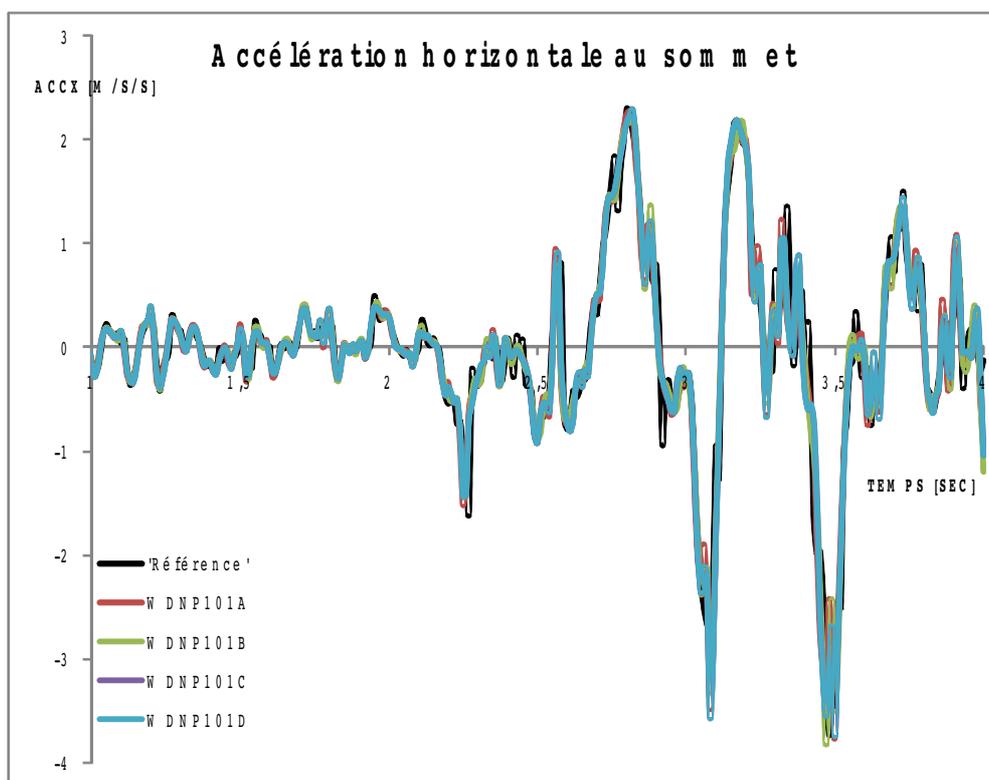


Figure 10-a : Évolution de l'accélération horizontale au sommet de la colonne. Comparaison des solutions des modélisations A, B, C et D avec la solution de référence.

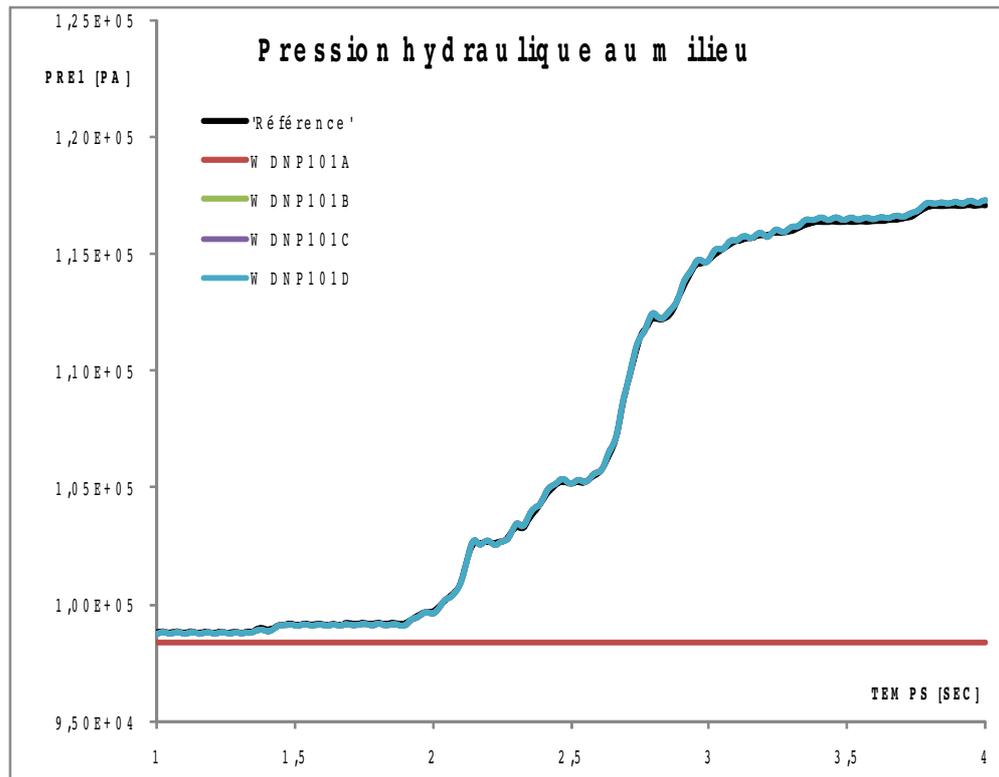
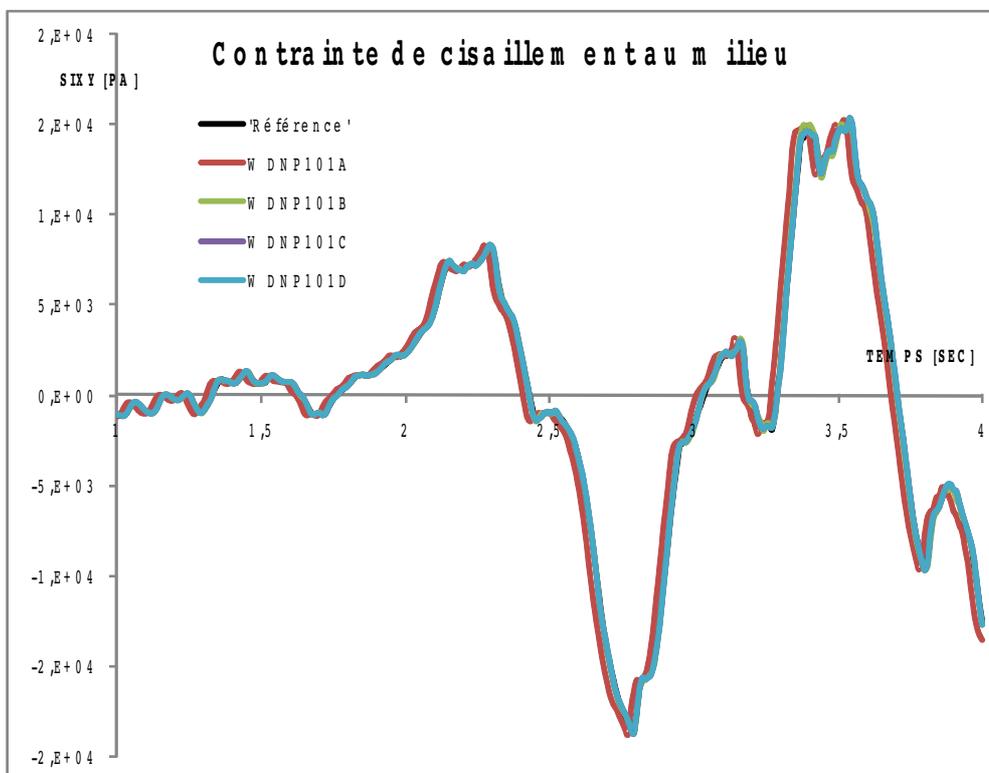
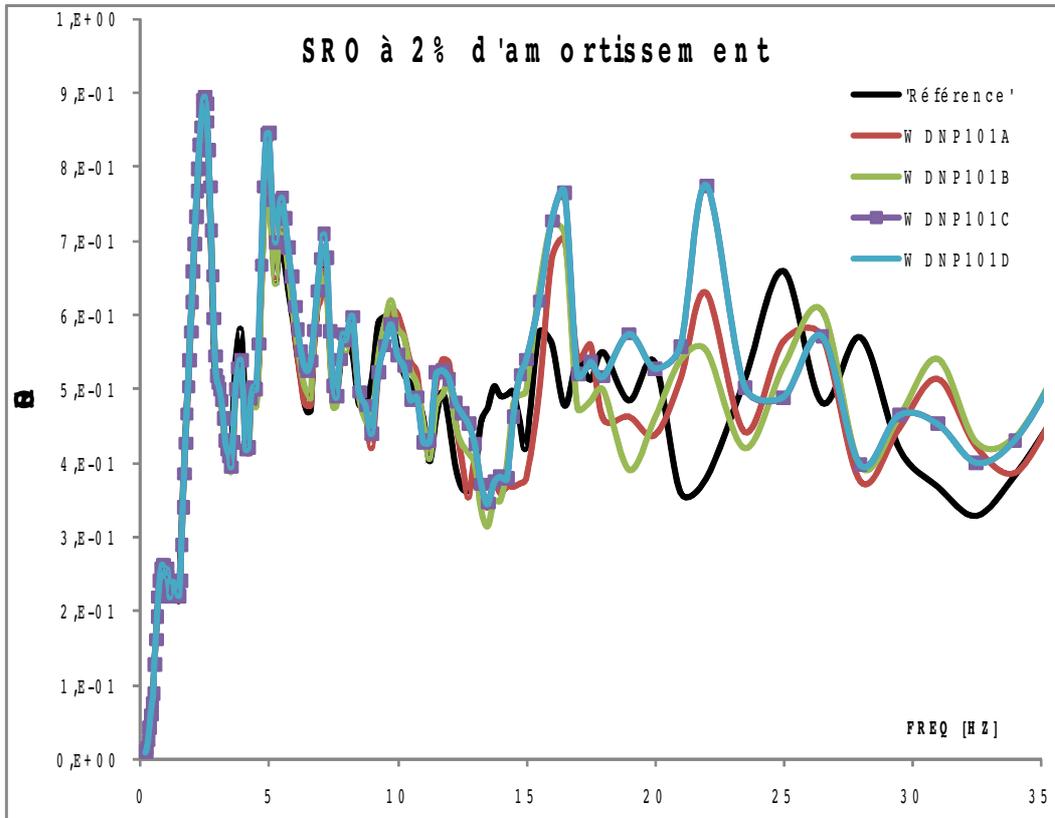


Figure 10-b : Évolution de la pression hydraulique au centre de la colonne. Comparaison des solutions des modélisations A, B, C et D avec la solution de référence.



**Figure 10-c : Évolution de la contrainte de cisailement au centre de la colonne.
Comparaison des solutions des modélisations A, B, C et D avec la solution de référence.**



**Figure 10-d : SRO au taux d'amortissement de 2% au sommet de la colonne.
Comparaison des solutions des modélisations A, B, C et D avec la solution de référence.**