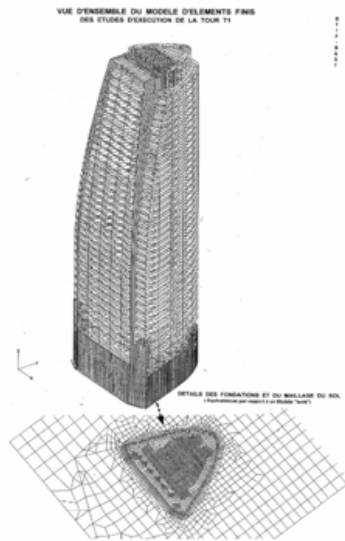


LA MODÉLISATION PAR ÉLÉMENTS FINIS

Modèle global d'étude d'exécution, Jean Michel HABLOT



Phase Étude



En Construction



Images de Synthèse

INTRODUCTION

- Modèle aux éléments finis de 1 million de DDL
- 12 à 16 phases de calcul
- Logiciel : Nastran for Windows
- 1 phase tourne en 35 minutes sur Pentium IV 2.8 GHz , 15 minutes sur processeur Core 2 Duo 3 GHz
- 6 Go de stockage disque
- 100 cas de charge de base
- enveloppe de 1500 combinaisons ELU pour le calcul des armatures

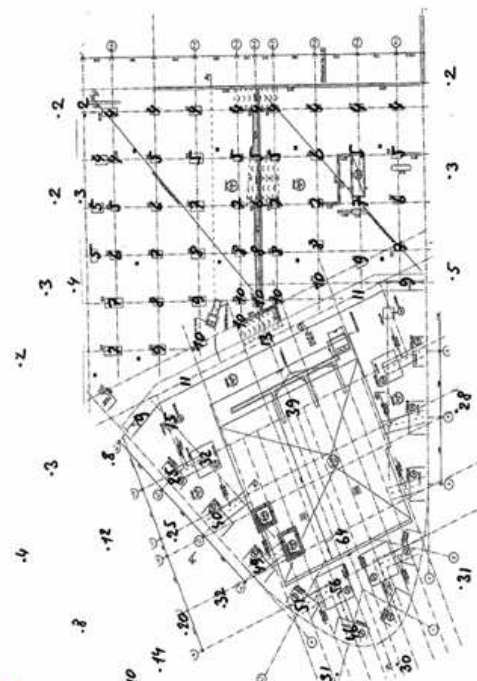


MODÉLISATION DU SOL

Sous la charge de la tour :

Le calcul du géotechnicien, fait selon la méthode de Boussinesq, fournit une "cuvette" des tassements sous une charge donnée (abstraction faite de la raideur de la structure). Cette cuvette est calculée par sommation des déformées individuelles de charges « ponctuelles » voisines, dont la somme est égale à la pression du bâtiment sur le sol.

Amplitude des tassements : tassements totaux (mm)

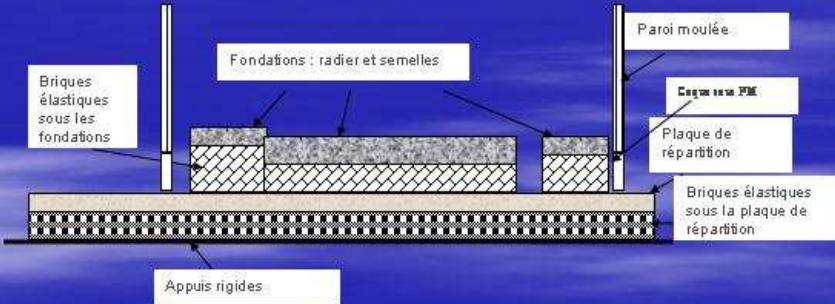




TOUR T1 : CONFÉRENCE & VISITE À LA DÉFENSE le 23/01/07



- Pour reproduire cette cuvette (tassement identique sous charge identique, la structure étant exclue) nous utilisons un artifice :
- Le sol est modélisé par 2 couches de briques séparées par une " plaque de répartition "
- Le radier et les semelles s'appuient sur la 1ère couche de briques, de raideur constante
- Ces briques s'appuient à leur tour sur la plaque de répartition, bien plus grande que la tour, et de raideur constante
- Sous la plaque se trouve la couche de briques de base, de raideur très variable, telle que les tassements calculés par Boussinesq soient vérifiés



Exposé : Modélisation globale d'études d'exécution

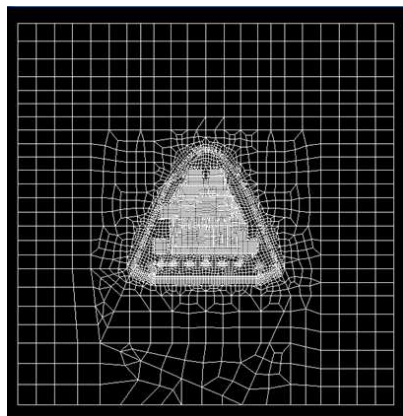
5

Avantages :

- les appuis sont couplés : quand on exerce une force à un endroit, le tassement se répartit sur tous les appuis, comme dans la réalité, et contrairement aux ressorts surfaciques utilisés habituellement dans les logiciels de calcul aux éléments finis
- la taille du modèle équivalent au sol est très faible devant la structure

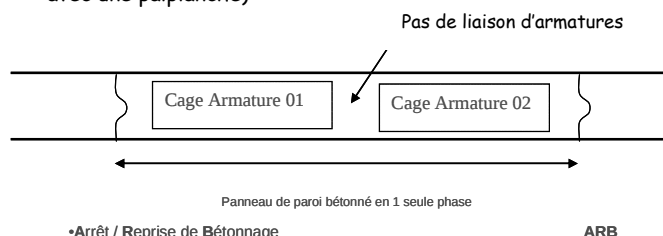
Inconvénients :

- n'est qu'une approximation sans comportement complexe (non linéaire, frottement, décollement...)
- la recherche de la raideur des différents éléments est empirique et nécessite plusieurs dizaines d'essais

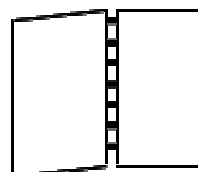


MODÉLISATION DES PAROIS MOULÉES

Les parois sont coulées par panneaux de 5 à 6 m de long avec 2 cages d'armatures non liées. Entre chaque panneau se trouve une reprise de coulage lisse (coffrée avec une palplanche) :



- Les principes retenus sont les suivants :
- modéliser le béton présent entre 2 cages d'armatures d'un même panneau par un matériau " différent " orthotrope, de raideur verticale identique et de raideur horizontale réduite, de façon à ajuster ses propriétés aux efforts qu'il peut supporter sans armatures ;
- disposer dans les joints lisses des " butons " dans le plan de la paroi, travaillant presque exclusivement en traction/compression.



- Pour limiter les tractions qui ne peuvent être reprises vu le joint sec :
- premier calcul avec les boutons tous actifs ;
- second calcul en désactivant les boutons tendus sous les combinaisons les plus courantes (en gros 1/5e des boutons présents)
- enveloppe de ces 2 analyses pour le dimensionnement
- Les compressions dans ces boutons peuvent dépasser 2 MN (# 2 MPa), les tractions parasites 600 kN



Exemple d'efforts de compression maxi entre panneaux de PM (unité : kN)

3. MODÉLISATION DE LA BUTÉE CONTRE LES PAROIS MOULÉES

- Le sol latéral est modélisé par une couche de briques orthotropes :
- liées au pied de la paroi encastré dans le sol (décollement impossible) ;
- liées à la paroi contre fouille, par des barres travaillant en traction/compression
- Si le décollement est important, ces barres doivent être remplacées par des " gaps " travaillant uniquement en compression → analyse non linéaire : chaque combinaison devient un cas de charge à part entière, à calculer séparément des autres, par une analyse incrémentale

Schéma de principe des appuis latéraux des parois :

- Appuis rigides
- 32.66
- 28.00
- AS joints de coussinets ou FPM
- Niveau de référence
- Gaps structuraux entre la FPM et le collecteur
- Brique pour appui horizontal ou des gaps, si existant avec tête
- Axe de la paroi murale
- Briques pour appui horizontal de la tête de la FPM
- Appui vertical FPM sur plaque de rep.
- Plaque de répartition

Exposé : Modélisation globale d'études d'exécution

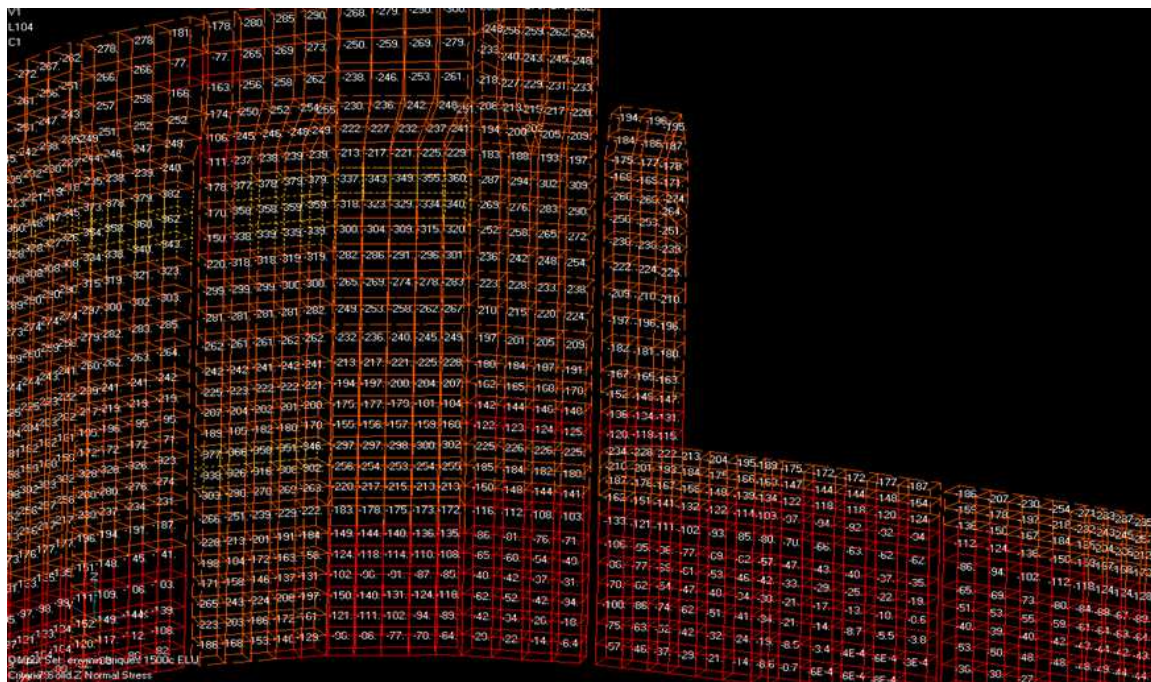
10

Dans le cas de T1, les tractions sont faibles et sur une petite surface : elles ont été négligées et les 1500 combinaisons de charge sont linéaires

- contrainte de compression maxi 380 kPa
- Faible traction sur une faible partie de la surface latérale

Le calcul est fait dans les 2 configurations :

avec butée (barres actives) ou sans butée (barres désactivées)
et tous les efforts et ferraillages sont enveloppes de ces 2 configurations.



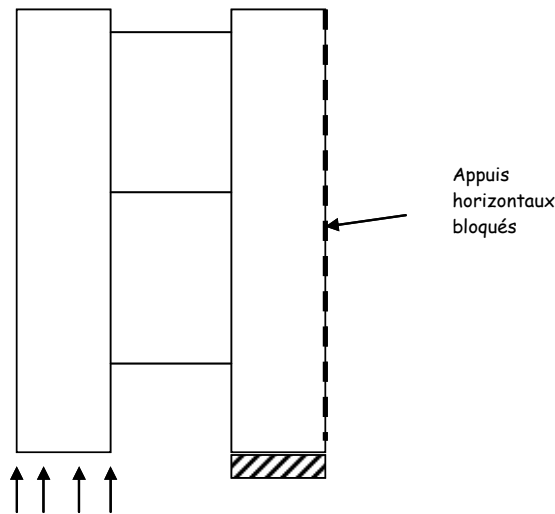
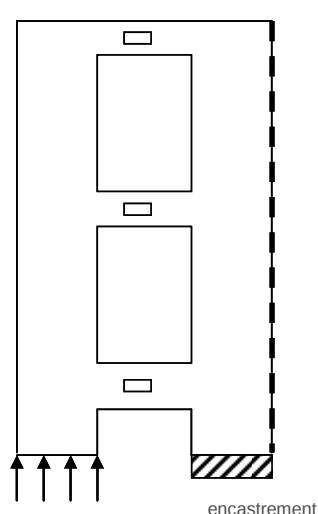
Contraintes de compression horizontale maxi ELU du sol sur la paroi moulée, au nez de la tour (kPa)

RAIDEUR DES LINTEAUX AVEC PERCEMENTS

La raideur des linteaux avec percements est estimée à partir de modèles simplifiés équivalents :

Linteaux en éléments de coques

Éléments de poutres équivalentes



On cherche la raideur des linteaux modélisés en poutres à partir de la comparaison des tranchants sur les linteaux des 2 modèles simplifiés

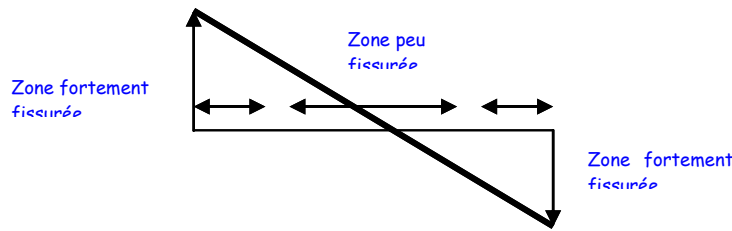
Résultats de 2 tests :

- ➔ pour un linteau de 35 * 95 h avec percement centré de 50 * 35h, il faut réduire l'inertie de flexion et la section réduite d'effort tranchant de 24 %
- ➔ même test avec un percement de 55 * 45 : inertie et S_r réduites de 30 %

RAIDEUR DES LINTEAUX FISSURÉS

La raideur des linteaux fissurés prend en compte la forme type de la courbe des moments d'un linteau de contreventement :

une " dent de scie " généralement symétrique



On peut donc calculer la flèche correspondante par les formules du BAEL en tenant compte des contraintes dans les aciers le long du linteau.

Dans le cas des linteaux de T1, on trouve une raideur équivalente (constante le long du linteau) de 67 % I_0 dans le sens X, et 59 % dans le sens Y (axes du modèle Bouygues), la section réduite d'effort tranchant restant inchangée.

Raideur des linteaux à la fois percés et fissurés

Nous retenons le produit des raideurs restantes après percement et fissuration.

Prise en compte de la raideur des linteaux

A long terme (charges G , G' et $0.77 Q$) : les linteaux sont non fissurés

A court terme (charges $0.23 Q$ et les 15 vents) : les linteaux sont fissurés comme décrit précédemment.

Dans la réalité, seule une partie des linteaux est fissurée sous une combinaison donnée, ces linteaux dépendent par exemple de la direction du vent.

→ L'approche retenue est sécuritaire, réduisant la raideur de la tour

ORDRE DE GRANDEUR DES RÉSULTATS

Résultantes des charges appliquées :

- combinaison $G + G' + Q$: 1428 MN
- moment maxi des 15 vents au niveau TN extérieur : 1900 MNm ELS

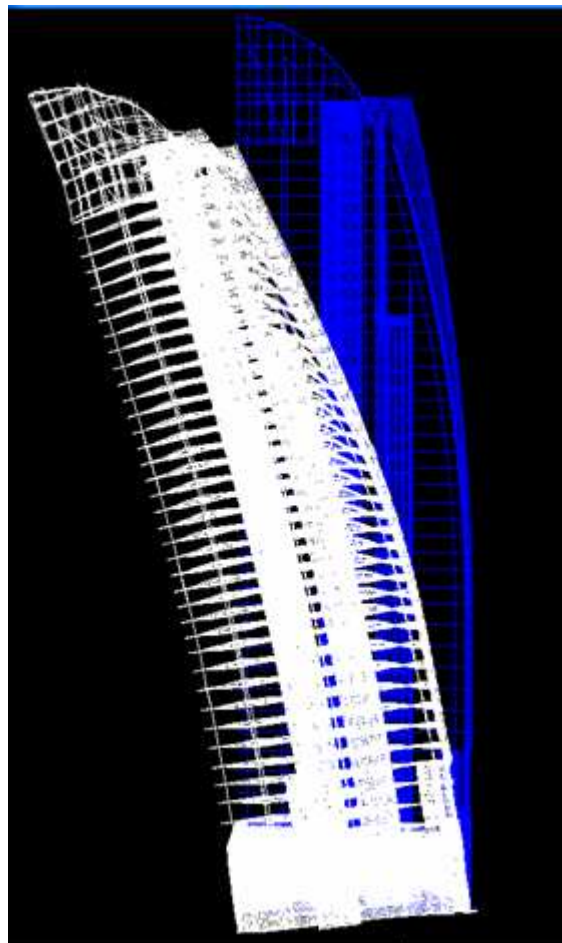
Contraintes au sol ELU :

- radier : 2.9 Mpa maxi
- paroi moulée : 6.6 MN/ml
- autres semelles : 2.5 Mpa

Déplacements :

- au plancher 200 NGF sous $G + G' + Q$: $U_h = 0.39$ m (sans phasage ni rattrapage des inclinaisons à l'avancement, très difficiles à représenter dans un modèle d'ensemble)
- même niveau, vent maxi : 0.14 m
- en tête de la poutre de couronnement (niveau extérieur = 50 NGF), sous $G + G' + Q$: 27 mm sans butée / 15 mm avec butée
- idem, vent maxi CSTB 21 : 5 mm sans butée / 3.3 mm avec butée
- tassement radier sous $G + G' + Q$: 59 mm
- idem, vent maxi CSTB 21 : 3.9 mm

Les ordres de grandeur sont un peu différents du modèle d'avant-projet, notamment pour les déplacements de la caisse d'infrastructure.



Efforts dans les linteaux :

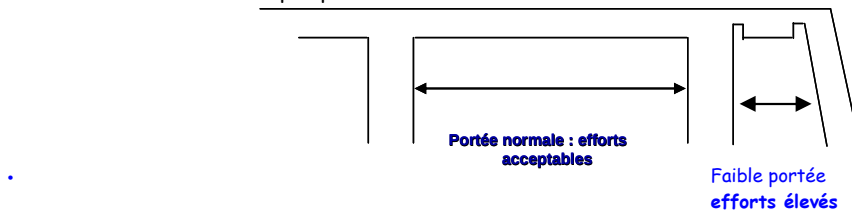
- entre files 11 et 10, hauteur courante 89 à 95 cm :
 $T = 0.81 \text{ MN}$; $M = 1.27 \text{ MNm}$
- file 9 : $T = 1.42 \text{ MN}$; $M = 1.3 \text{ MNm}$, linteaux les plus courts et les plus chargés (cisaillement = 4.5 MPa)

Calcul des poutres de la structure :

Ces poutres ne sont jamais chargées en travée dans le modèle (sauf si reprise de poteaux)
Les efforts du modèle sont dus uniquement au fonctionnement d'ensemble
Il faut y rajouter les courbes de moments dus aux efforts en travée (Caquot)

Efforts dans les poutres de façade :

Zones spéciales aux endroits où les poteaux se rapprochent : les poutres ont des joints équivalents à des rotules, pour éviter les efforts de modèle trop importants.



Sans ces précautions, les moments peuvent atteindre 2 à 3 MNm dans des poutres de 40 * 75h seulement, bien évidemment incapables de supporter de tels efforts. Ces moments impliquent des transferts d'efforts normaux d'un poteau à l'autre.

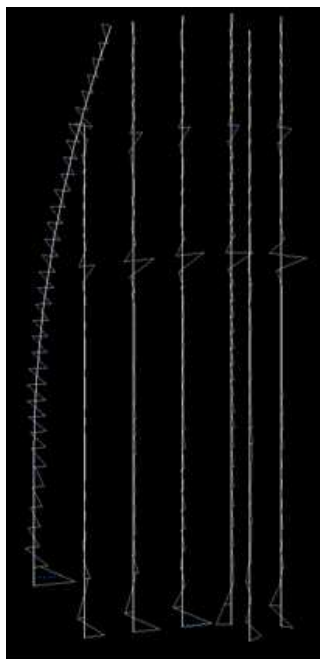
Après « élimination » des poutres trop chargées, les efforts maximaux trouvés atteignent $M = 0.8$ à 1.2 MNm

A ces efforts doivent être cumulés les moments dus aux charges courantes en travée

La reprise du contreventement par « le portique » de façade est de l'ordre de 15 % en pied (sur les efforts tranchants).

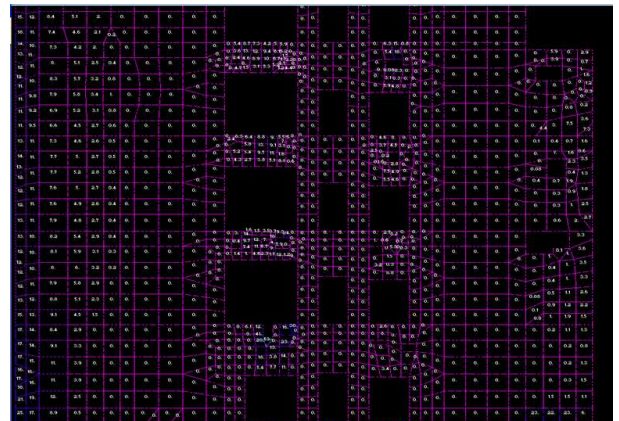
Efforts dans les poteaux :

- Ils sont tirés du modèle mais leur valeur est proche des descentes de charges manuelles
- Tassements et affaissements calculés indépendamment du modèle
- Les poteaux reprennent des moments de contreventement comme les poutres de façade.



Efforts dans les voiles :

- en infra : contrainte = 20 MPa ;
- en super basse = 15 MPa
- ferraillages verticaux théoriques des voiles souvent nuls (en phase définitive) : l'effort normal de compression annule tout cisaillement (il reste cependant des tractions limitées dans le voile extérieur du noyau)
- les linteaux de grande hauteur sont modélisés en coques avec leurs voiles supports
- la plupart des percements importants sont modélisés

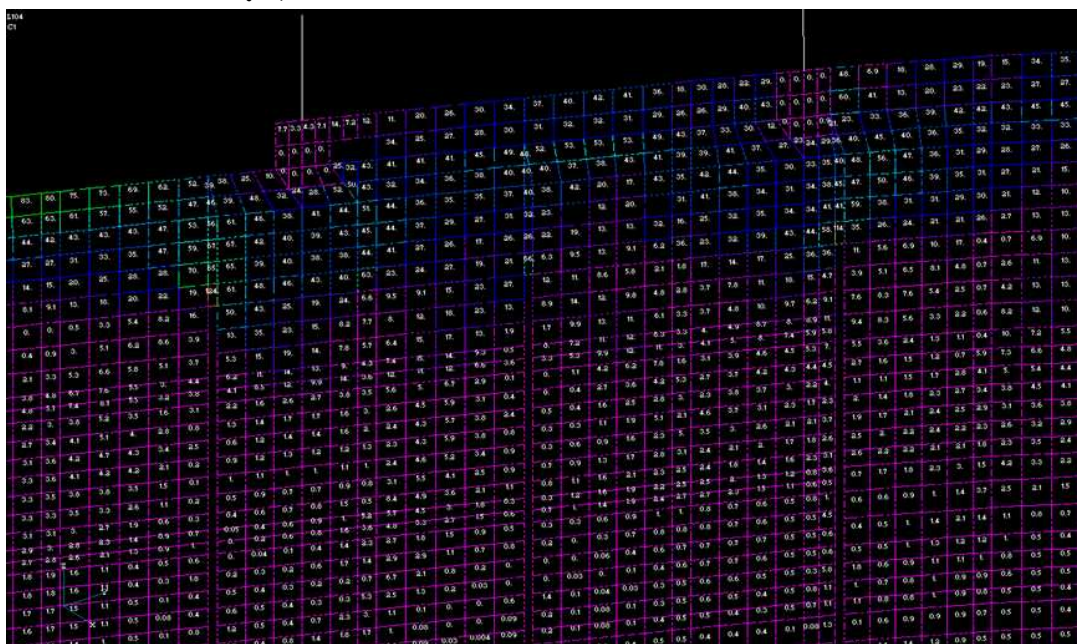


Exemple de « carte d'armatures » d'un voile avec linteaux et nombreux percements

Poutre de couronnement au-dessus des PM :

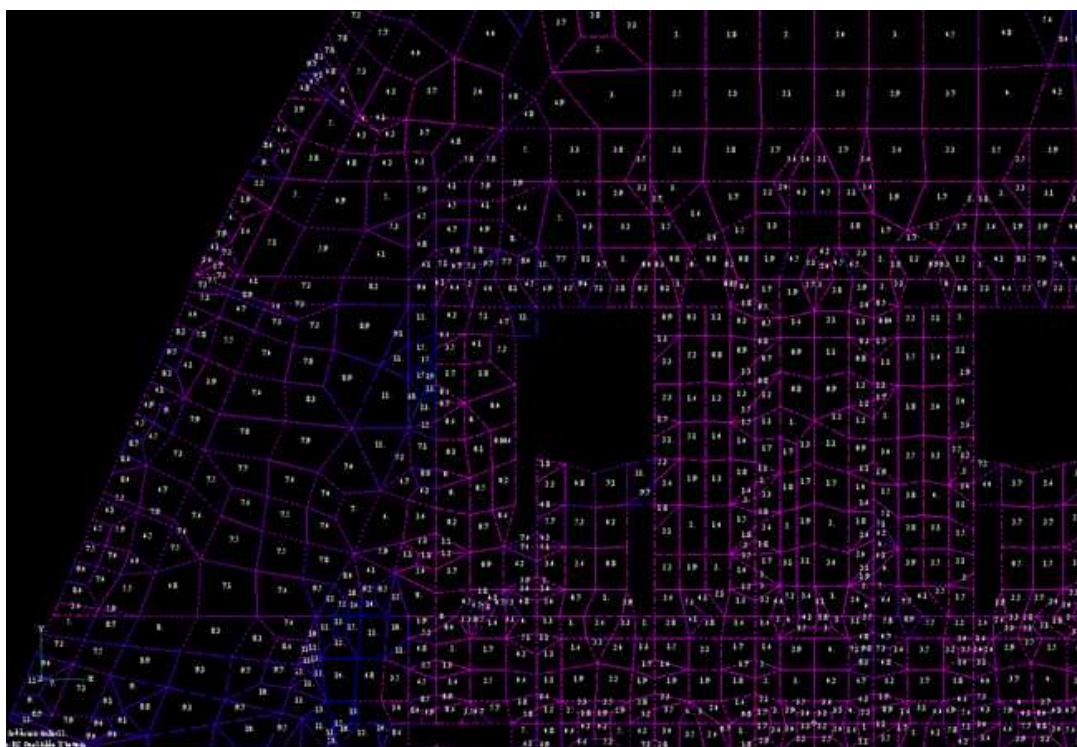
Cette poutre transfère aux panneaux de parois les descentes de charges des poteaux de façade, reprend seule les cisaillements entre panneaux de parois adjacents et participe à l'effet portique dans le plan de la paroi.

→ ses aciers sont donc élevés (jusqu'à 80 cm²/ml/face) : voir schéma suivant



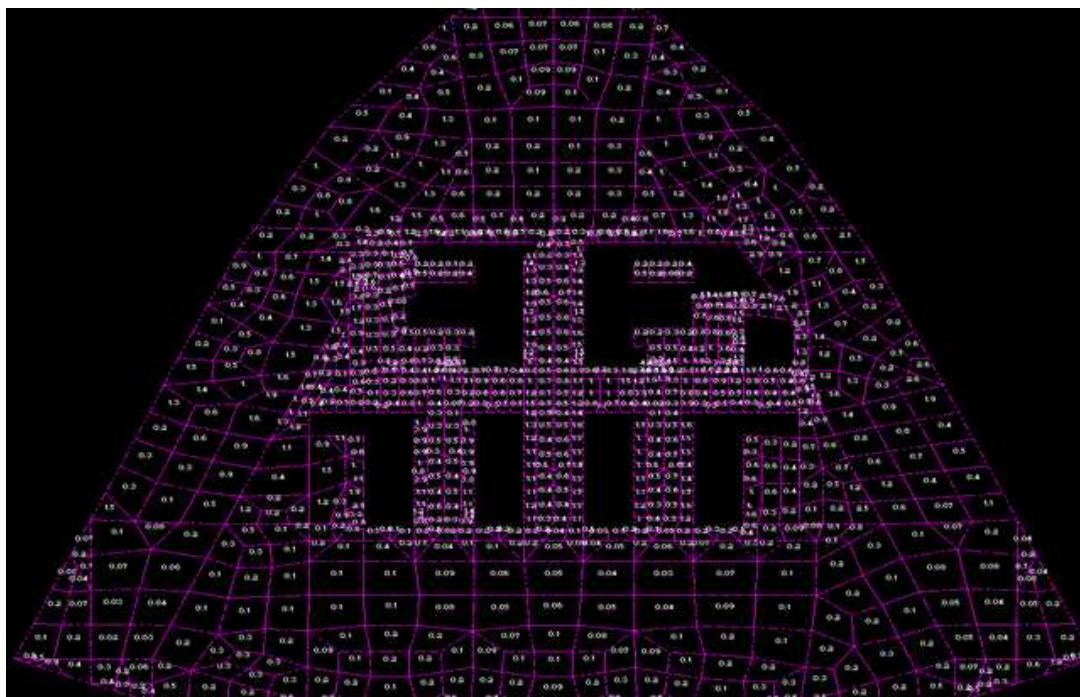
Efforts dans les dalles :

- **en infra** : supportent la poussée/butée du sol ; il existe des efforts de membrane qui nécessitent jusqu'à 10 cm²/ml/face en plus des aciers de flexion courante



- **en super** : peu d'efforts car la raideur des structures extérieures (façade) est très faible devant celle du noyau, et les effets de l'inclinaison de la façade Nord sont dilués
- cartes d'armatures souvent presque nulles sauf points singuliers isolés

A ces aciers de modèle doivent être ajoutés les aciers de flexion des dalles BA



Fréquences propres de la tour :

- raideur du sol retenant des résultats "bibliographiques" d'essais cross-hole du sol de la Défense
- cette raideur est environ 20 fois plus élevée que celle à long terme (tassement millimétrique)
- 2 calculs faits : avec butée latérale du sol ou sans butée ; résultats très voisins

Avec butée :

Mode 1 : $f = 3.002636E-01$ Hz

Mode 2 : $f = 3.055190E-01$ Hz

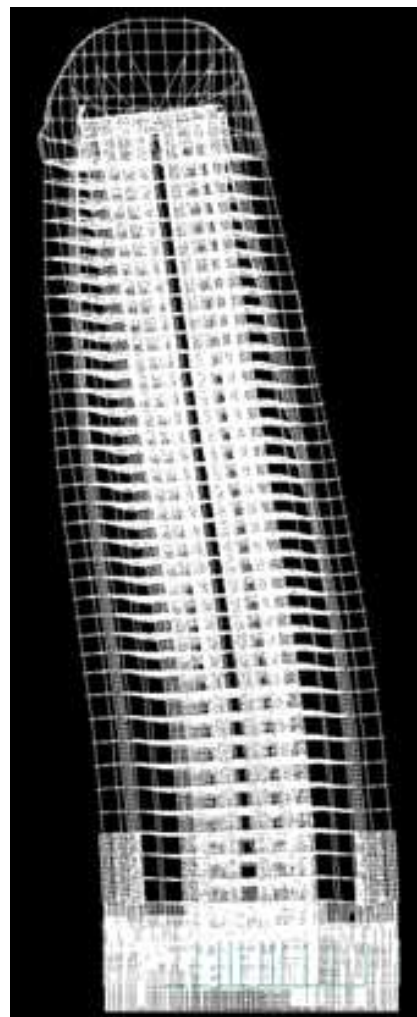
Mode 3 : $f = 5.109225E-01$ Hz

Sans butée :

Mode 1 : $f = 2.978625E-01$ Hz

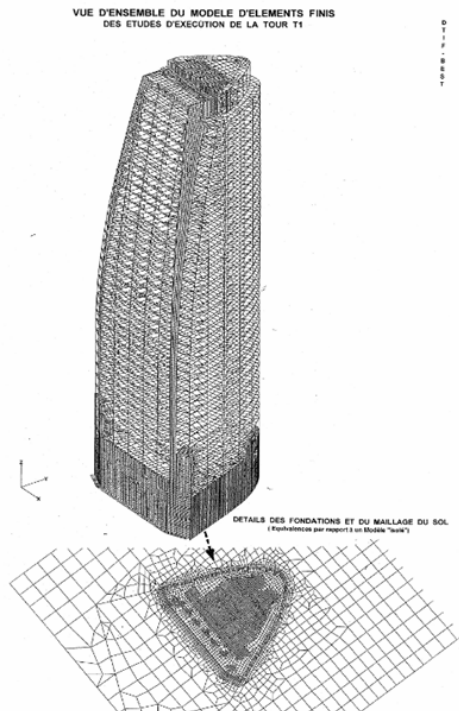
Mode 2 : $f = 3.036318E-01$ Hz

Mode 3 : $f = 5.089157E-01$ Hz



LA MODÉLISATION PAR ÉLÉMENTS FINIS

Comparaison et limitation, *Philippe BUSI*



ENJEUX DES « DOUBLES » MODELES IF-BEST de T1 :

1- EN PHASE ANTICIPEE (Fin d'études commerciales / Mise au point du Marché) :

→ Mesurer l'incidence d'ajustements d'hypothèses ou de nouvelles demandes du client comme :

Rapport de sol complémentaire.

Ajustement du vent vis à vis de la réponse dynamique de la Tour.

Demande de considérer la stabilité de la Tour avec ou sans butée jusqu'au niveau du radier.

Engagement sur des niveaux d'accélération (et périodicité) dans la Tour.

→ «Gérer» des variantes TCE impactant la conception de structure, par ex :

Structure de façade : Allège → Poutre avec moins de participation de la façade au contreventement et donc plus pour le noyau.

« Caisse » d'infrastructure : Paroi + Eperons → Paroi Moulée et Méga Poutre de Couronnement avec de grosses réservations.

2- EN PHASE DE DEBUT D'EXECUTION :

→ Disposer au plus tôt pour les premiers ouvrages de fondations, d'un modèle déjà testé sur lequel un minimum d'ajustements sont à établir, comme :

Recalage d'implantation de certains porteurs.

Prise en compte de la présynthèse et de mesures conservatoires.

Intégration de sujétions logistiques et de chantier.

Positionnement exact des joints de panneaux de paroi moulée.

Ceci était nécessaire pour garantir le démarrage au plus tôt des Parois Moulées (OS + 2 mois, mais avec date d'OS non connue !)

→ Anticiper les moyens à mettre en oeuvre et faciliter la mise au point détaillée du modèle global, en exploitant les analyses du premier modèle (solicitations, Inerties fissurées, qualité de béton...) avant d'en comparer les résultats.

TOUR T1: CONFÉRENCE & VISITE à LA DÉFENSE le 23/01/07					
COMPARAISON DES « DOUBLES » MODELES IF-BEST de T1 :					
EXTRAIT : COMPARAISONS DE MODELISATIONS IF-BEST SUIVANTS TECHNIQUES DÉTAILLÉS			M1 à M8 AP	M Global EXEC	Ecart (EXEC-AP) / EXEC
HYPOGENERALES DE MODELISATION					Analyse - EXPLICATIONS
Code EF :			EFFEL V12	NASTRAN V2004	
Personnes :	Modélisateurs		X + Y	X	
	Définition et contrôle des Hypothèses		Y + Z	Z + équipe	
CHARGES					
Verticales (T)	G0 Total		106 300	104 800	-1.4%
	SP Total		12 600	16 250	22.5%
	SV Total		28 900	27 780	-4.0%
	G0 + SP + SV		147 800	148 830	0.7%
Vents (T et Tm) Moments par rapport au niveau NGF 25					
Comparaison / NV 65	W = VN50 (T)		2 200	1 811	-21.5%
	M à 30.5 NgF		248 667	220 000	-11.5%
	Maxi		2 020	1 811	-11.5%
	M à 25 NgF		258 847	232 060	-11.5%
deuxième enveloppe	Tranchant		1 630	1 635	0.3%
	M à 25 NgF		243 470	207 672	-17.2%

Exposé : MODELISATION PAR ELEMENTS FINIS / COMPARAISONS ET LIMITATIONS

Ph. BUSI
4



TOUR T1: CONFÉRENCE & VISITE à LA DÉFENSE le 23/01/07



COMPARAISON DES « DOUBLES » MODELES IF-BEST de T1 :

EXTRAIT DE COMPARAISONS DE MODELISATIONS IF-BEST			AP	EXEC	Ecart	Analyse - EXPLICATIONS
SUJETS TECHNIQUES DETAILLES				BY	(EXEC-AP) / EXEC	
RESULTATS						
Contraintes Fondations ELU	Radier max (t/m2)		220	290	24.1%	Le radier du modèle d'AP était un peu plus grand mais les grandes semelles n'y étaient pas attachées et en EXEC le CV passe plus au centre
	Semelles # 5*5		130 à 220	210	26.0%	
	Autres		170 à 200	250		
Charges verticales sur PM (ELU)	Maxi en Tête (t/ml)		420			Radier et PM : localement + 20%
	Maxi en Pied (t/ml)		550	665	17.3%	
Contraintes Horiz butée sur PM	Maxi (t/m2)		35	38	7.9%	L'écart est très faible malgré la précision toute relative des calculs d'AP : estimation des butées par correction "estimative" des déplacements horizontaux de la caisse d'infra
Charges vert sur pot. façade Rez (MAX ELU T)	File 13		3 737	3 780	1.1%	Charges sur poteaux : écarts < 10%
	Pointe Sud		4 614	4 203	9.8%	
Déformations (mm) enveloppes Horiz SANS BUTEE	sous G + Q (sens Y)	Niv 200	330	390	15.4%	Variations de déformations : +15%
		Niv 45 (butée de PM)	3 à 8 mm			
	sous W (sens)	Niv 200	160.8	140	-14.9%	
		Niv 45 (butée de PM)				
	sous 100 T à LT en tête	Niv 200	34.7	26.3	-23.9%	
	Niv 200 sens X (trans)	Niv 45 (butée de PM)	1.2			
	sous 100 T à LT en tête	Niv 200	33.3	29.5	-12.3%	
	Niv 200 sens Y (N-S)	Niv 45 (butée de PM)	1.2			

Exposé : MODELISATION PAR ELEMENTS FINIS / COMPARAISONS ET LIMITATIONS

Ph. BUI

5

Exposé : MODELISATION PAR ELEMENTS FINIS / COMPARAISONS ET LIMITATIONS

Ph. BUSI

5



TOUR T1: CONFÉRENCE & VISITE À LA DÉFENSE le 23/01/07



LIMITES DES MODELES :

Les calculs non linéaires de gros modèles sont gourmands en énergie et pas toujours bien « digérés » par les codes de calculs.

→ sur T1 ceci a été une des raisons du choix de « NASTRAN » pour le modèle d'exécution : Butée de la caisse d'Infra et test sur « P x Delta ».

Les combinaisons de chargements sont du type « RDM » : pas de travées chargées / déchargées... automatiques pour l'ensemble.

→ « Gestion » des chargements de modèles en fonction des codes de calculs, des types de structure, de l'organisation et des moyens de post-traitements.

Les caractéristiques (Sect, Inertie...) des sections BA sont constantes (ou 2, 3 cas LT-CT-DYN) pour les cas de charges et combinaisons.

→ « Caler » les valeurs sur l'objectif principal à analyser et le cas échéant faire des corrections.

Le phasage de construction détaillé n'est pas pris en compte dans un modèle global.

→ Les cas de phases provisoires sont analysés à part

Nota : Le code « PONT-ARC » de la direction scientifique de BY- construction permet de gérer le phasage et les lois d'évolution des matériaux, mais ceci est plus adapté à des modèles d'ouvrages d'art avec des volumes (ddl) plus modestes et des temps de calculs acceptables.

→ Notamment les grosses modélisations nécessitent une expertise reconnue et imposent d'établir des notes descriptives des hypothèses, de la modélisation et des auto-contrôle et contrôles externes au modélisateur.

→ Les ingénieurs exploitants les résultats de modèles BY IF-BEST disposent d'une notice d'utilisation.

Ph. BUSI

Exposé : MODELISATION PAR ELEMENTS FINIS / COMPARAISONS ET LIMITATIONS

6

Exposé : MODELISATION PAR ELEMENTS FINIS / COMPARAISONS ET LIMITATIONS

Ph. BUSI

6



TOUR T1: CONFÉRENCE & VISITE à LA DÉFENSE le 23/01/07



LIMITES DES MODELES :

Modèles non phasés en détail et sans loi détaillée de matériaux :

→ Post-traitements nécessaire pour tenir compte :

- des dates de chargements
- des parts de déformations déjà faites avant le début d'intervention d'une tache (GO, façade, Corps d'état ...)

EXEMPLE : Coefficients multiplicateurs moyens des déformations du modèle global vis à vis de la Façade :

CC(GO) : Coef de Construction GO = Déformations GO actives après construction GO du PH concerné / Déformations totales GO

CN(FAC) : Coef Nuisible Façade = Déformations déjà faites avant la pose de façade / Déformations totales "GO"

CS1 : Coef de Stabilité 1 = Déformations avec butée / Déformations enveloppes

	CC(GO)	CN(FAC)	CS1
PH 36	0.60	0.16	0.85
PH 28	0.70	0.26	0.84
PH 20	0.80	0.26	0.82
PH 14	0.86	0.20	0.80
PH 08	0.93	0.18	0.76
PH-01	1.00	0.11	0.55
Moyenne =	0.79	0.18	0.75

Ph. BUSI

Exposé : MODELISATION PAR ELEMENTS FINIS / COMPARAISONS ET LIMITATIONS

7



TOUR T1: CONFÉRENCE & VISITE à LA DÉFENSE le 23/01/07



LIMITES DES MODELES :

Modèles non phasés en détail et sans loi détaillée de matériaux :

→ Post-traitement nécessaire : exemple

AFFAISSEMENTS THEORIQUES DES PORTEURS

Calcul de l'affaissement pour le PH entre les dates suivantes :

DEBUT : Coulage du plancher
Date : 591 jours

FIN : 30 ans
Date : 11 950 jours

Légende
164 déformations verticales du modèle (mm)
114 déformations verticales totales (mm)
91 déformations verticales totales (mm) tenant compte de l'historique
110 affaissements théoriques (coulage des planchers à

Rappel des dates-clés
Début Travaux : 0 jour
Coulage du plancher : 591 jours
Pose des façades : 688 jours
CE F aux-plafond : 753 jours
CE Faux-plancher : 813 jours
0
Fin Infra : 330 jours
Fin du PH+3 : 395 jours
Fin du PH+8 : 400 jours
Fin du PH+18 : 475 jours
Fin du PH+28 : 540 jours
Fin du GO : 625 jours
Fin des façades : 725 jours
Fin des CES : 830 jours
Livraison/Exploitat* : 1 000 jours
2 ans : 1 730 jours
40 ans : 35 040 jours

Déformations Verticales théoriques (mm)	au PH = 36 date de fin = 30 ans
Hypothèses :	P3.1
Modèle global non phasé et modules (LT, CT)	114
Calculs avec historique de chargements et loi AFREM	164
Affaissement depuis le coulage = à partir de l'historique, en prenant en compte le rattrapage des affaissements déjà produits sur les niveaux inférieurs (avec le coulage des planchers aux niveaux NGF théoriques)	91

Ph. BUSI / N. BROSSIER