

# Modélisation numérique 3D d'un système de fondation d'un complexe immobilier

## 3D numerical modeling of a foundation system of a building complex

Reynaud S., Allagnat D., Mazaré B.  
EGIS Géotechnique, Grenoble, France

Julien T.  
EIFFAGE CONSTRUCTION, Clermont-Ferrand, France

**RÉSUMÉ :** Pour la construction d'un nouveau complexe immobilier au centre-ville de Clermont-Ferrand, la société EIFFAGE CONSTRUCTION a confié à EGIS Géotechnique les études d'exécution du système de fondation. Le projet est situé sur une ancienne cheminée volcanique, dans des silts lâches de forte épaisseur. Le système de fondation consiste en un radier général fondé sur un sol renforcé par des colonnes de transfert de charges en jet grouting, elles-mêmes reliées à un bouchon général injecté. Conformément au souhait du client, le système de fondation a été modélisé de façon numérique en 3 dimensions, comprenant chaque colonne de transfert. Le logiciel FLAC 3D a été utilisé pour constituer ce modèle. La première difficulté est de parvenir à constituer un modèle numérique viable et à maîtriser les temps de calcul. La seconde difficulté est de modéliser correctement le comportement mécanique du système, notamment des colonnes de transfert et de leur liaison avec le radier. Plusieurs itérations ont été nécessaires pour parvenir à un couplage correct entre la modélisation de la structure et celle du sol (sol+fondations+radier). L'objectif de cette modélisation est de vérifier les tassements, les contraintes dans les éléments modélisés et les efforts dans les colonnes de transfert.

**ABSTRACT:** For the construction of a new buildings complex in the city center of Clermont-Ferrand, EIFFAGE CONSTRUCTION society entrusted to EGIS Géotechnique the design studies for the execution of the foundation system. The project is located on an ancient volcanic chimney, within loose thick silts. The system consists of a foundation raft constructed upon a soil reinforced by jet grouted columns for load transfer; the columns are interconnected within a jet grouted bedding layer. According to the client's needs, the foundation system was numerically modeled in three dimensions, with each load transfer columns. The software FLAC 3D was used for this model. The first challenge is to establish a viable numerical model and to control the computation time. The second challenge is to correctly model the mechanical behaviour of the system, notably the load transfer columns and connections with the foundation raft. Several iterations are necessary to achieve a good correlation between the structure and soil models (soil+foundations+foundation raft). The objective of this modelisation is to verify the settlements, the stresses within the modeled elements and the forces within the load transfer columns.

**MOTS-CLES :** Modélisation numérique 3D, couplage des modèles, fondations, sol renforcé, jet grouting,

**KEYWORDS:** 3D numerical modelisation, correlation of models, foundations, reinforced soil, jet grouting,

## 1 INTRODUCTION

Pour la construction d'un nouveau complexe immobilier situé au centre-ville de Clermont-Ferrand, à proximité de la place de Jaude, EIFFAGE Immobilier (promoteur) et EIFFAGE Construction Auvergne (constructeur) ont confié à EGIS Géotechnique les études d'exécution du système de fondation de ce complexe. L'objet de cette étude est la modélisation complète du système de fondation. Ce complexe est composé de bureaux, de bâtiments d'habitation, d'un centre commercial, d'un cinéma, d'un hôtel et de deux niveaux de sous-sol, sur une surface de plus d'un hectare (11 500 m<sup>2</sup>).

La particularité du site étudié est sa nature géologique : ancienne cheminée volcanique ayant entaillé le substratum marneux et marno-calcaire de l'Oligocène, puis ayant été comblée de sédiments lacustres voire fluviatiles du type silt, argile molle et sable de très faible compacité. Cette particularité a conduit les concepteurs à opter pour un renforcement général du sol par colonnes sécantes de jet grouting, constituant un bouchon, disposé au-dessous du radier. Ce bouchon injecté est connecté au radier par des colonnes de transfert de charges en jet grouting selon un maillage particulier.

L'objectif des études d'exécution est d'optimiser le système de fondation tout en garantissant son fonctionnement en statique et en dynamique (sous chargement sismique). Dans ce cadre, Egis Géotechnique a proposé une modélisation numérique 3D avec le logiciel FLAC 3D, permettant la modélisation du

renforcement général et de chaque colonne de transfert (1650 unités au total).

Les études d'exécution ont repris les hypothèses géotechniques et les principaux résultats d'une étude de projet (de type G2) réalisée par la société FUGRO. Les études d'exécution ont été menées en concertation avec le bureau d'études structure SIGMA et le bureau de contrôle VERITAS. L'élaboration des modèles a été réalisée avec l'appui de la société ITASCA (commercialisant FLAC 3D).

Sont présentées dans le présent article les principales hypothèses géomécaniques, la méthodologie de calcul mise en œuvre et quelques illustrations des résultats.

## 2 CONTEXTE

### 2.1 Nature du sous-sol

La succession des terrains est la suivante : **des remblais** divers et des limons sur une épaisseur de 3 m environ, de compacité faible en tête puis la présence de **calcaires travertinisés** avec des pics de compacité dont le niveau correspond avec celui de la nappe. Ensuite sont rencontrés des **silts** de compacité plutôt faible sur une épaisseur de l'ordre de 5m, puis **des sables assez compacts** sur une épaisseur de l'ordre de 10 m. Enfin, sont rencontrés **des silts sur une forte épaisseur** (de plasticité moyenne à forte), de compacité faible

mais croissante avec la profondeur. Le niveau moyen de la nappe se situe à 3m de profondeur.

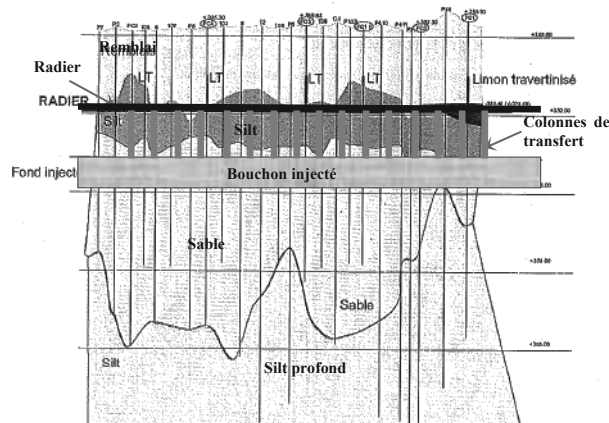


Figure 1. Coupe du sous-sol (extrait étude G2, FUGRO).

## 2.2 Système de fondation

Le système de fondation est composé d'un « bouchon injecté » d'une épaisseur variable entre 2 et 3m en fonction de la profondeur du radier et de son épaisseur (4 zones définissent le radier). Il est constitué de colonnes de jet grouting sécantes. Sa profondeur et son épaisseur sont fixées de manière à assurer la stabilité provisoire à la sous-pression hydraulique (état-limite UPL selon les Eurocodes 7) : l'arase supérieure du bouchon est placée entre 3.0 et 3.2m sous le radier. Le bouchon est relié au radier par des colonnes de transfert de charge en jet grouting de 1.2m et 1.4m de diamètre disposées selon une maille régulière en partie courante et selon une maille renforcée dite en « marguerite » au droit des porteurs (voiles et poteaux).

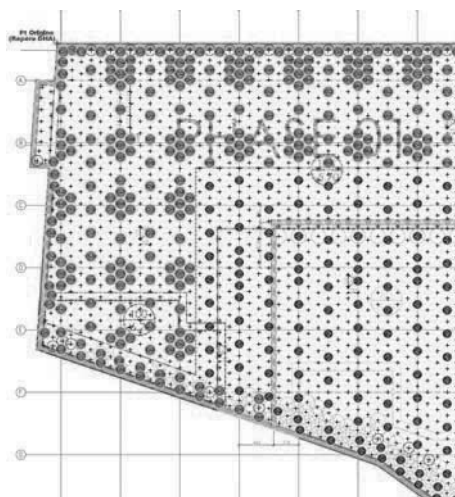


Figure 2. Extrait du plan d'implantation des colonnes de transfert

Le système de fondation sera analysé dans un premier temps avec des modèles locaux exploratoires comprenant quelques colonnes seulement, puis par un modèle global intégrant toute la superficie du bâtiment. C'est à partir du modèle global que le dimensionnement final a été réalisé.

## 2.3 Modèle géo-mécanique

Le modèle géo-mécanique retenu est présenté dans le tableau 1.

Tableau 1. Modèle géo-mécanique du remblai, silt et sable

Paramètres	Remblai	Silt	Sable
$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	20.1	18.2	20.1
$\phi'$ (°)	25	25	33
$c'$ (kPa)	2	0	0
Modèle élastique linéaire :			
$E_y$ (kPa)	5 000	1 800	20 000
$\nu$	0.3	0.3	0.3
Angle de dilatance $\psi$ (°)	-	-	3
Modèle de sol avec écouissage (Hardening soft-soil model) :			
Module d'élasticité volumique, K (kPa)	-	-	16 700
Contrainte moy. max. $p_c$ (kPa)	-	-	60 / 500
Déformation volumique à la contrainte $p_c$ (%)	-	-	0 / 2.6
$K_{max} = 3.k$ (kPa)	-	-	50 000

Concernant les silts profonds, il a été retenu le modèle de Roscoe, « Cam-Clay » modifié, adapté pour les limons plastiques à très plastiques, normalement consolidés. Les paramètres de ce modèle ont été calés sur la base d'essais en laboratoire (essais oedométriques) et d'essais in situ (pressiométrique et prénétrométrique). Deux hypothèses dites « raisonnables » et représentatives de la variation des mesures ont été envisagées ; elles sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 2. Modèle géo-mécanique des silts profonds

Paramètres	Silts profonds (hyp.1)	Silts profonds (hyp.2)
$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	18.2	18.2
$\phi' / M = 6. \sin\phi / (3 - \sin\phi)$	25 / 0.984	25 / 0.984
$c'$ (kPa)	2	2
$K_o$	0.58	0.58
Modèle Cam-Clay :		
$C_c / \lambda$	0.7 / 0.304	0.7 / 0.304
$C_s / \kappa$	0.06 / 0.026	0.07 / 0.030
$\nu$	0.3	0.3
OCR_max (cote 375.5) *	1.30	1.25
OCR_min (cote 350.0) *	1.05	1.00

\*Cote TN : 385.5 NGF

Aucun phénomène de consolidation secondaire n'a été pris en compte, les études de projet ayant montré que ces terrains ne sont pas sujets au fluage dans le domaine des contraintes appliquées.

## 2.4 Mode de représentation des colonnes de jet grouting sous FLAC3D et caractéristiques mécaniques

Le bouchon injecté a été représenté comme une couche de sol améliorée (éléments volumiques). Les colonnes de transfert ont été représentées sous forme d'éléments volumiques pour les modèles locaux et d'éléments structurels pour le modèle global.

Les caractéristiques mécaniques des colonnes de jet grouting dans les conditions statiques (colonnes de transfert et bouchon injecté) sont indiquées dans le tableau 3.

Les contraintes admissibles sont indiquées dans le tableau 4.

Il n'est admis aucune résistance à la traction dans les éléments de jet grouting.

Tableau 3. Caractéristiques mécaniques des colonnes de jet-grouting

Paramètres	Colonne de jet grouting
$\gamma_{\text{sat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	18
$f_c$ (MPa)	6
$E_y$ (MPa)	2 000
$\nu$	0.2

Tableau 4. Critères mécaniques pour les colonnes de jet-grouting

Paramètres	Sous G	Sous G+0.3Q+E
Contrainte moyenne	0.30 $f_c$	-
Contrainte maximale	0.60 $f_c$	0.85 $f_c$ /1.15
Section comprimée	100%	10%
Tension de coupure (bouchon injecté)	0	0

Pour le modèle global, la condition de liaison entre les colonnes de transfert et le radier a fait l'objet d'un développement particulier du modèle. Afin de simuler un encastrement non « parfait » aux extrémités des colonnes de transfert, une souplesse est introduite sous forme d'une rotule plastique : le moment dans la colonne est alors borné par la valeur du moment plastique. La prise en compte d'une telle rotule nécessite des calculs itératifs car le moment plastique est fonction de la contrainte axiale. Le processus a été le suivant : première itération sans rotule (encastrement) pour évaluer les contraintes axiales et les moments plastiques correspondants, seconde itération avec les rotules plastiques pour vérification du respect des contraintes admissibles pour chaque colonne et le cas échéant, définition de nouvelles rotules plastiques, puis nouvelles itérations jusqu'à vérification complète.

L'objectif de ces calculs est de vérifier que l'introduction des moments plastiques ne perturbent ni l'équilibre global du système de fondation (analyse des déplacements), ni les contraintes dans le bouchon.

### 3 MODÈLES LOCAUX EXPLORATOIRES – CALAGE DU MODÈLE

Trois modèles « locaux » exploratoires ont permis d'analyser, pour des cas de chargements représentatifs, la répartition des charges dans le bouchon injecté via les colonnes de transfert. L'intérêt de ces modèles est de présenter une taille limitée et par conséquent d'être de résolution rapide. L'intérêt est également de valider la géométrie du système et de caler certains paramètres avant de lancer la simulation numérique du modèle global.

Les modèles locaux représentent un volume limité mais jugé représentatif du radier. Chaque élément est modélisé comme un élément volumique (élément maillé). Les chargements étudiés sont les suivants : le cas de chargement le plus défavorable dans la zone renforcée (calcul 1), le cas de chargement le plus défavorable en zone non renforcée (calcul 3) et le cas du chargement uniforme égale à la moyenne du chargement global appliqué sur le radier (calcul 2).

Les résultats mettent en évidence que le maillage renforcé permet de respecter les critères de contraintes dans les éléments de jet grouting. Ils valident le diamètre minimal des colonnes de transfert (1.2m en zone renforcée, et 1.0m en zone non renforcée) et l'épaisseur minimale du bouchon injecté définie pour assurer la stabilité de la fouille en phase provisoire (2m).

Il est observé que ce système de fondation permet une diffusion rapide des charges dans le bouchon injecté et une répartition quasi uniforme du chargement à la base du bouchon.

Nous présentons dans la figure 3 les résultats du calcul 1.

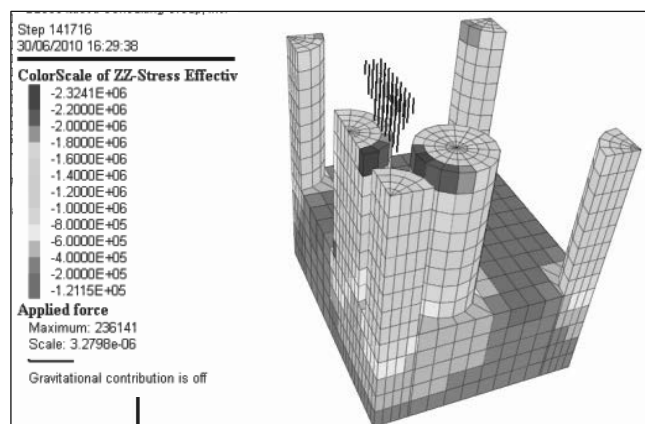


Figure 3. Modèle local, calcul n°1, zone renforcée (Nu=15113 kN) – Représentation des contraintes verticales effectives (Valeur moyenne : 1630 kPa, Valeur maximale : 2320 kPa) - Unité : Pa

## 4 SIMULATION STATIQUE DU MODÈLE GLOBAL

### 4.1 Couplage des modèles

Le dimensionnement de l'ensemble du projet est basé sur un système composé de deux modèles en interaction : le modèle 1 de la superstructure avec un logiciel propre (Advance Design et ANSYS) et le modèle 2 du sous-sol intégrant le système de fondation avec un autre logiciel (FLAC 3D). La difficulté de ce système est d'obtenir un couplage cohérent entre les deux modèles et une simulation correcte de l'interaction sol-structure. Cet objectif a été atteint en procédant à une série d'itérations entre les deux modèles.

Une première évaluation analytique des raideurs verticales du sol (raideurs surfaciques) a été effectuée sur la base des résultats de déformation du radier issus de l'étude de projet (simulation aux éléments finis en 2D). Ce premier champ de raideurs surfaciques a permis une première simulation de la structure et l'obtention d'une première descente de charges (3 zones principales de raideur et une zone périphérique d'ajustement nécessaire à l'approche « Winkler », raideur majorée). Cette première descente de charges a permis de lancer la première simulation numérique avec FLAC 3D. De cette première itération, il a été déduit un nouveau champ de raideurs verticales, cette fois-ci ponctuelles, calculées au droit de chaque colonne de transfert. Ce deuxième champ de raideurs a fait l'objet d'une nouvelle simulation de la structure et l'obtention d'une nouvelle descente de charge cette fois-ci au droit de chaque colonne. A partir de cette seconde descente de charge, un troisième calcul des raideurs a été effectué et a permis de confirmer la convergence du système par adéquation des déformées du radier fournies par chaque modèle. Les résultats en termes de déformation, d'efforts et de contraintes ont alors pu être exploités.

### 4.2 Résultats du modèle 2

Nous analysons tout d'abord les efforts dans toutes les colonnes de transfert modélisées sous forme d'un élément structural. La figure 4 est un extrait du modèle 3D global, en condition statique. Les efforts traduisent la répartition des charges appliquées, sachant que les files des colonnes à maille renforcée suivent les porteurs (voiles et poteaux). Un cas représentatif du porteur le plus chargé est un voile de section transversale 0.40mx2.0m chargé à 15 110 kN (résultante verticale). La charge répartie correspondant à la valeur moyenne du chargement global sur le radier est de 135 kPa.

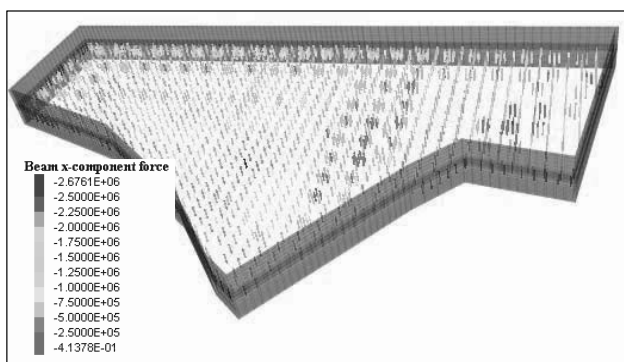


Figure 4. Modèle global - Efforts axiaux dans les colonnes de transfert (Valeur moyenne : 804 kN, Valeur maximale : 2680 kN) - Unité : N

La combinaison du critère de la contrainte maximale et de la section comprimée est représentée dans le graphe  $M=f(N)$  de la figure 5. Le critère de la contrainte moyenne est vérifiée par ailleurs. C'est l'introduction des rotules plastiques qui permet d'aboutir au respect des critères.

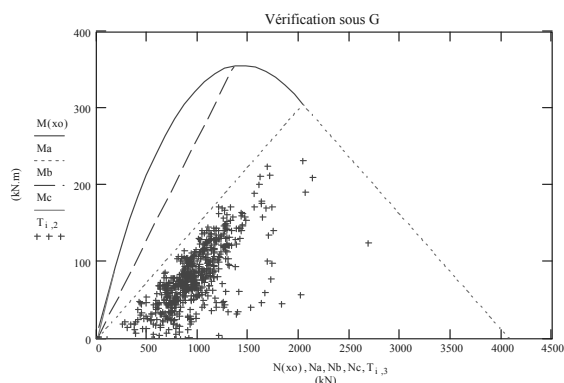


Figure 5. Modèle global - Valeurs M, N des colonnes de transfert (diamètre 1.2m)

Nous analysons ensuite la déformée du radier. L'introduction des rotules plastiques en tête des colonnes de transfert conduit à un état d'équilibre stable qui ne modifie pas la déformée globale ni du radier, ni du bouchon, ce qui valide la vérification des efforts. La répartition des tassements est cohérente avec la descente de charges et les conditions géotechniques. En effet, on observe une augmentation des tassements au niveau de la partie Est, caractérisée par une remontée des silts profonds lâches (cf. figure n°6). La valeur maximale calculée s'élève à 11 cm (valeur proche de la valeur de projet : 13cm).

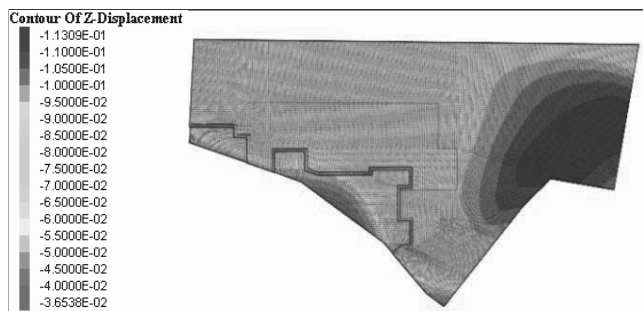


Figure 6. Modèle global - Répartition des tassements sous le radier (Valeur maximale bleu: 11cm, Valeur minimale rouge: 4cm) - Unité : m

Ce premier résultat a permis de fournir une carte des différentiels de tassement, critère fondamental pour le dimensionnement du radier. Ce critère est fixé à  $\Delta W/\Delta L < 1/500^{\text{ème}}$ . Seule une zone limitée du radier fait apparaître un gradient compris entre 400 et 500. Cette zone a donc fait l'objet d'une vérification particulière de la section béton-armé du

radier. Il a également été vérifié les tassements aux avoisinants. Les calculs ont montré qu'ils sont d'amplitude modérée et que le gradient reste supérieur à 500 et à 1000 au-delà de 15m de distance à la paroi.

D'autre part, sont analysées les contraintes dans le bouchon injecté. Il a été procédé à deux étapes de calcul pour mieux simuler le phénomène physique de mise en tension du bouchon. La première étape a consisté à élever volontairement la traction de coupure dans le bouchon ( $R_c/2=3000$  kPa), ce qui a permis de localiser les zones en traction : deux zones limitées ont été mises en évidence (traction inférieure à 50 kPa). La seconde étape de calcul a consisté à annuler la tension de coupure dans les zones en traction, ce qui a permis d'évaluer l'incrément de déplacements verticaux. Cette étape simule l'apparition de fissures dans les zones tendues du bouchon. On observe que les incréments de déplacement sont très faibles (inférieurs au millimètre) ce qui a permis de conclure que la fissuration obtenue par l'absence de résistance à la traction ne modifie pas l'état d'équilibre du système de fondation.

## 5 CONCLUSION

La modélisation numérique en 3 dimensions d'un système de fondation pour un radier de 11500m<sup>2</sup> peut s'avérer complexe et sa fiabilité toute relative sans vérification préalable.

Avant de simuler un modèle global, il est apparu indispensable de simuler des modèles locaux dans des configurations représentatives qui permettent de fiabiliser la géométrie et le fonctionnement du système radier / colonne de transfert / bouchon / sols.

Afin d'assurer la fiabilité des résultats, il est fondamental de procéder à des itérations successives nécessaires au couplage du modèle de structure avec le modèle de sol (couplage effort / déplacement, c'est à dire ajustement de la raideur du sol).

Un effort particulier a été mené sur les modèles mécaniques du sol, des éléments de structure et sur les liaisons entre éléments afin de représenter au mieux les phénomènes physiques. L'atteinte de cet objectif nécessite également des tests et des vérifications.

Enfin, ce projet montre que la modélisation numérique en 3D permet de représenter des phénomènes physiques qui n'auraient pas pu être appréhendés « intuitivement » ou simplement par une analyse 2D (forme des déformations du radier, effet des liaisons des colonnes, effet de la traction de coupure dans le bouchon). Le premier contrôle des tassements, effectué sur une période de 12 à 18 mois depuis l'achèvement des bâtiments (construction phasée et terminée au 3/4 environ), confirme les résultats obtenus par la modélisation 3D. Les mesures finales du tassement permettront de mieux apprécier ces résultats.

## 6 RÉFÉRENCES

Itasca Consulting Group, Inc.2006. Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, Minneapolis, Minnesota, USA.  
 Koscielny M., Briançon L., Dias D.,2007, Projet national A.S.I.R.I, Synthèse benchmark tranche 1, thèmes 1&4, CNAM, Paris  
 Bagagli Y., Vincens E., Fry J.J., 2010.a model for the computation of engineering earth structures to a seismic motion. EJECE Volume 14 – No.5/2010, 599-616  
 Leroueil S., Magnan J.P., Taveans F. 1985. Remblais sur argiles molles. Technique et Documentation Lavoisier, Paris.  
 Université Joseph Fourier, Laboratoire "3S", 2006, Pratique éclairée des éléments finis en Géotechnique, Les Modèles de comportement, Marseille,  
 Cordary D., 1995, Mécanique des sols, Lavoisier, Paris