

# **FONDATION D'IMMEUBLES DE GRANDE HAUTEUR PAR MICROPIEUX A SEUIL MINIMAL DE TASSEMENT**

## ***FOUNDATION OF HIGH-RISE BUILDINGS BY MINIMAL THRESHOLD SETTLEMENT MICROPILES***

Emmanuel CHANGEON<sup>1</sup>, Paul VIDIL<sup>2</sup>, Mathias RABOURDIN<sup>3</sup>

<sup>1</sup> SOLETANCHE BACHY, Rueil Malmaison, France

<sup>2</sup> SOLETANCHE BACHY

<sup>3</sup> SOLETANCHE BACHY

**RÉSUMÉ** – Dans le cadre d'un chantier d'Immeuble de Grande Hauteur (IGH), nous avons été amenés à dimensionner des fondations profondes à seuil minimal de tassement afin de préserver la future superstructure des problématiques de tassement différentiel. Nous avons alors conçu et mis en œuvre avec succès un système de fondation composite associant un groupe de micropieux et un appareil d'appui en élastomère fretté.

**ABSTRACT** – In the context of a high-rise building job site, we had to design minimal threshold settlement deep foundations in order to protect the superstructure from differential settlement issues. We therefore successfully designed and built a composite foundation system, mixing a group of micropiles and a laminated elastomeric bearing pad.

### **1. Introduction**

Le projet ALTO, débuté à partir de 2016 à La Défense (92) par BOUYGUES, prévoit la construction d'une tour de 150 mètres de haut et de sa structure externe, dite exostructure Nord, reliées l'une à l'autre.

Il s'est révélé indispensable de limiter le tassement différentiel entre la tour, très fortement chargée et fondée sur paroi moulée et barrettes, et son exostructure faiblement chargée et fondée sur trois massifs.

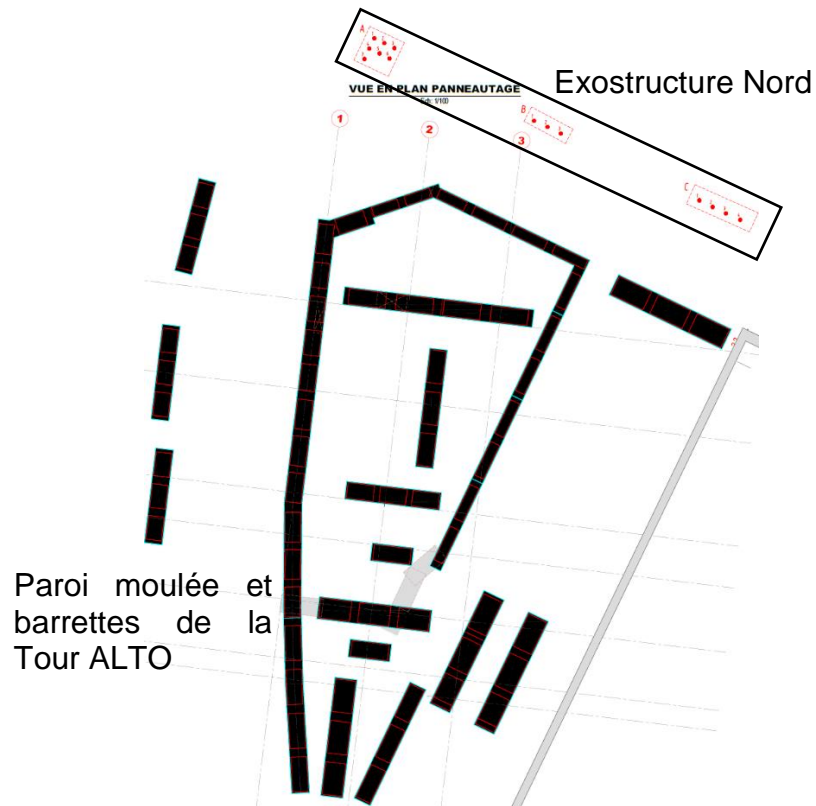
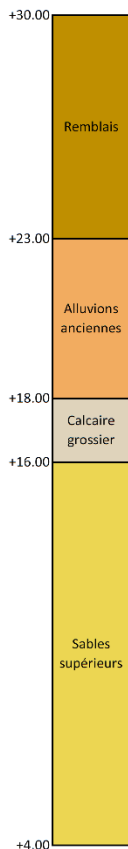
Pour ce faire, les trois massifs ont été fondés sur un ensemble original constitué d'un groupe de micropieux et d'un appareil d'appui en élastomère fretté, nous permettant ainsi de garantir l'atteinte d'un seuil minimal de tassement de l'exostructure et respecter conséquemment le critère de tassement différentiel avec la tour.

Cet article vise à détailler la solution technique innovante retenue, à exposer la méthode d'estimation du tassement des micropieux, ainsi qu'à proposer une comparaison entre les tassements théoriques et les tassements mesurés lors des essais de chargement.

## 2. Contexte du projet

### 2.1. Localisation et géologie du site

Le projet est basé à La Défense (92), à proximité de la Seine. Le contexte géologique et l'implantation des trois massifs de l'Exostructure Nord par rapport à la tour sont les suivants :



### 2.2. Solution initiale

La solution du marché consistait à atteindre le seuil minimal de tassement des structures externes de la Tour en les fondant sur des micropieux disposant d'une longueur libre plurimétrique en tête (de l'ordre de 3 à 5 m selon les massifs). Les problématiques inhérentes à cette solution étaient les suivantes :

- Le tassement minimal à obtenir, compris entre 12 et 16 mm selon les massifs, représentait une valeur très importante au regard du diamètre des fondations profondes envisagées (200 mm) ;
- Les valeurs importantes de tassement recherchées conduisaient à choisir des tubes de faible section et, par conséquent pour les justifier intrinsèquement, de très haute limite élastique (*a minima* V110,  $f_y = 760$  MPa voire 960 MPa) qui, outre l'inconvénient d'être plus fragiles, ne sont généralement pas en stock et souffrent de délais d'approvisionnement très importants ;
- Il n'était pas possible d'augmenter la longueur libre sans réduire d'autant la longueur scellée des micropieux. En effet, compte tenu de la présence de barrettes à proximité, les micropieux ne devaient pas dépasser de la base de celles-ci dans le souci d'éviter tout transfert de charges ;

- La création d'une « vraie » longueur libre se révèle toujours être une tâche ardue sur des micropieux, y compris en mettant en œuvre un revêtement PEHD ou un brai époxy, compte tenu du fait qu'il subsiste toujours un frottement résiduel (pouvant atteindre 20 à 30 kPa). Par ailleurs, le fait de recourir à du sur-forage afin d'assurer la longueur libre aurait engendré des sujétions de flambement peu compatibles avec l'intensité des charges verticales appliquées ;
- L'estimation du tassement sous chargement des fondations profondes se fait généralement à l'aide des formulations semi-empiriques proposées par Frank et Zhao, établies pour des pieux dont le diamètre est compris approximativement entre 0,80 et 1,20 m. De plus, même en recalant les modules pressiométriques  $E_M$  et les frottements axiaux unitaires  $q_s$  à partir des essais en traction réalisés sur les micropieux du projet adjacent (Parking ALTO), il n'en demeure pas moins qu'il reste délicat de garantir précisément le tassement d'un micropieu scellé.

Une fois les obstacles ci-dessus levés, un essai de compression instrumenté sur micropieux était prévu. Cet essai n'étant aucunement une garantie de résultat, il nous apparaissait primordial, dans le cadre de la gestion des risques, de prévoir le cas où les essais ne donneraient pas satisfaction (i.e. le tassement engendré n'atteindrait pas le seuil minimal et ne serait donc pas suffisant).

### 2.3. Solution technique retenue

A la lumière de l'analyse présentée ci-avant, nous avons décidé de dissocier la garantie du tassement – assurée principalement par un appareil d'appui en élastomère fretté – de la reprise des charges verticales par les micropieux.

D'où la fondation composite mise en œuvre, constituée de deux massifs en béton armé enserrant un unique appareil d'appui, le tout fondé sur un groupe de micropieux comme schématisé sur la figure suivante :

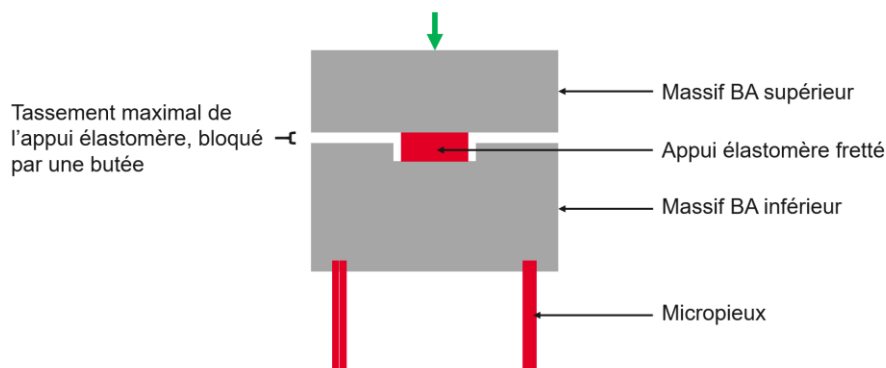


Figure 3. Principe de la fondation composite mise en œuvre

De cette manière :

- L'incertitude sur le tassement d'ensemble est fortement réduite, le tassement réel de l'appareil d'appui pouvant facilement être vérifié sur un banc d'essai préalablement à sa livraison sur chantier ;
- La mise en place d'une butée entre les deux massifs en béton armé rend impossible un tassement de l'appareil d'appui supérieur à la valeur souhaitée ;
- Il est loisible de réaliser des micropieux de limite élastique (type N80,  $f_y = 560$  MPa) et de dimensions courantes (diamètre de perforation de 200 mm), scellés sur toute leur hauteur, le tout injecté de manière globale et unitaire (I.G.U).

Dans cette conception variante, le tassement de chaque massif est donc la somme du tassement propre des micropieux et de l'appareil d'appui, selon le principe de fonctionnement schématisé suivant :

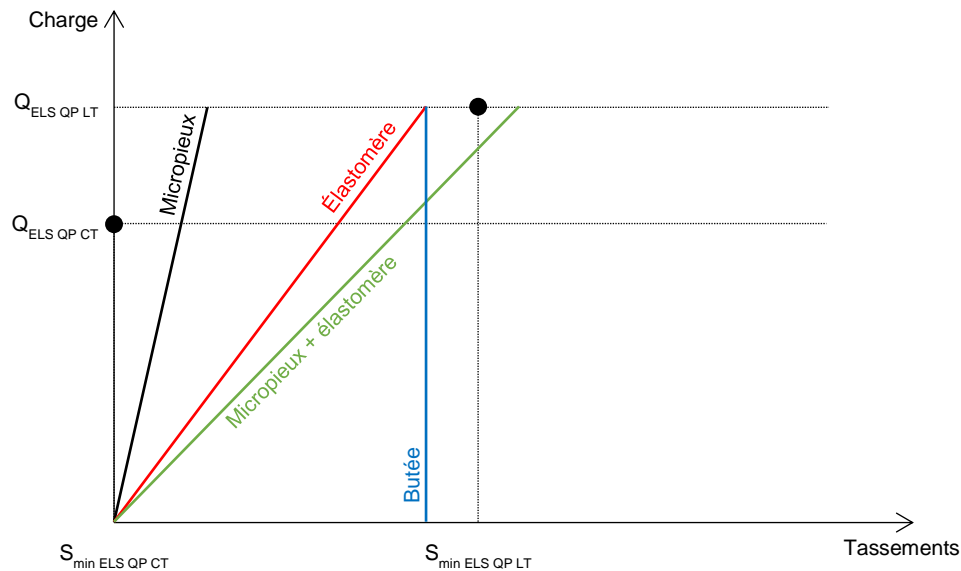


Figure 4. Principe de la fondation composite mise en œuvre

Il reste dès lors uniquement à s'assurer que le tassement total obtenu est bien supérieur ou égal au tassement seuil visé.

### 3. Tassements seuils visés et méthode d'estimation des tassements

#### 3.1. Tassements seuils visés

Les tassements seuils visés des trois massifs de l'Exostructure Nord ont été définis à partir de la cuvette de tassement de la Tour, elle-même issue d'un modèle aux éléments finis 3D, en considérant le critère courant de tassement différentiel maximal de  $1/500 \cdot L$  entre la Tour et ses structures externes.

Le seul état limite justifiant le contrôle des tassements s'est avéré être l'Etat Limite de Service Quasi-Permanent à long terme, correspondant au chargement 30 ans après la livraison du Gros-Œuvre de la Tour.

Les tassements seuils visés ainsi que les chargements associés pour chaque massif sont synthétisés ci-dessous :

Tableau 1. Tassements visés par massif et charges verticales associées

Massif	$s_{min}$ (mm)	$N_{ELS QP LT}$ (MN)
A	12	15,62
B	13	2,94
C	16	6,82

Compte tenu de la présence de moments portés par les deux axes horizontaux, le barycentre des fondations de chaque massif a été calé de manière à être confondu avec le point d'application de l'effort axial tenant compte de l'excentricité. De cette manière, sous l'état limite considéré pour l'étude du tassement, tous les micropieux sont soumis à la même charge verticale.

### 3.2. Estimation du tassement des micropieux

Les calculs de tassement des micropieux ont été réalisés via la méthode de Frank et Zhao, sur la base des deux jeux de données nous permettant la réalisation de calculs en fourchette que nous présentons ci-après :

La fourchette haute des tassements est obtenue à l'aide d'un premier jeu de données, constitué des modules pressiométriques issus de la G2 PRO et des valeurs de frottement axial  $q_s$  issues des abaques de la norme NF P 94-262.

La fourchette basse des tassements est quant à elle obtenue à l'aide d'un second jeu de données, constitué des modules pressiométriques et valeurs de frottement axial  $q_s$  recalés suite aux essais à la rupture réalisés précédemment dans des conditions identiques et à proximité immédiate (projet du Parking ALTO).

Par ailleurs, tous les calculs de tassement sont menés i) en négligeant le terme de pointe des micropieux, ii) en négligeant la corrosion des tubes métalliques, iii) en considérant la section courante des tubes métalliques.

Tableau 2. Données utiles au calcul des tassements des micropieux

	Fourchette haute	Fourchette basse
Remblais	$E_M = 5 \text{ MPa}$ $q_s = 90 \text{ kPa}$	$E_M = 10 \text{ MPa}$ $q_s = 200 \text{ kPa}$
Alluvions anciennes	$E_M = 40 \text{ MPa}$ $q_s = 270 \text{ kPa}$	$E_M = 40 \text{ MPa}$ $q_s = 640 \text{ kPa}$
Calcaire grossier	$E_M = 30 \text{ MPa}$ $q_s = 250 \text{ kPa}$	$E_M = 40 \text{ MPa}$ $q_s = 860 \text{ kPa}$
Sables supérieurs	$E_M = 90 \text{ MPa}$ $q_s = 350 \text{ kPa}$	$E_M = 90 \text{ MPa}$ $q_s = 585 \text{ kPa}$

Les calculs en fourchette permettant de pallier les incertitudes sur les données d'entrée mais pas sur la méthode utilisée, il a été décidé de tenir compte d'une marge de sécurité forfaitaire de 2 mm sur le tassement des micropieux, à rattraper par un tassement augmenté de la même quantité des appareils d'appui en élastomère fretté.

Les résultats des calculs en fourchette du tassement propre des micropieux sous chargement ELS QP LT par la méthode de Frank et Zhao sont récapitulés ci-après :

Tableau 3. Estimation du tassement des micropieux

Massif	Sthéorique (mm) <i>Fourchette haute</i>	Sthéorique (mm) <i>Fourchette basse</i>	Marge (mm)	Tassement propre minimal visé (mm) <i>= Fourchette basse - marge</i>
A	10	8	2	6
B	9	6	2	4
C	9	6	2	4

Précisons que ce projet étant un cas particulier, l'unité retenue pour les calculs de tassement des micropieux est le millimètre, et non le centimètre comme dans le cas général.

### 3.3. Estimation du tassement des appareils d'appui

La conception et la fourniture des appareils d'appui en élastomère fretté ont été effectuées par FREYSSINET, tout comme la réalisation des essais en compression en usine, sur la base des efforts normaux et tassements seuils visés suivants :

Tableau 4. Estimation du tassement des appareils d'appui

Massif	Effort normal (kN)	Tassement minimal requis (mm)	Tassement estimé (mm)
A	15620	7	8,4
B	2940	8	8,4
C	6820	11	11,1

## 4. Comparaison des tassements théoriques et réels

### 4.1. Essais de contrôle en compression sur micropieux

Les essais de contrôle en compression sur micropieux ont été menés à 1.0\* ELS QP LT afin d'assurer la représentativité de l'essai vis-à-vis des charges amenées à être réellement appliquées. On joint ci-après l'évolution des tassements théoriques et réels en fonction de la charge appliquée, pour les deux micropieux testés (un sur le massif A et un sur le massif C) :

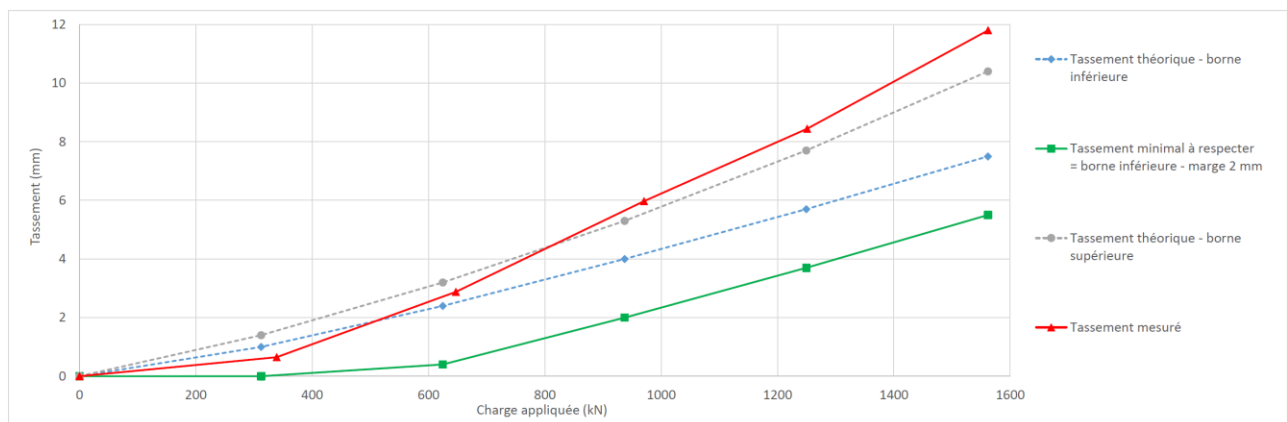


Figure 5. Evolution du tassement propre du micropieu testé – Massif A

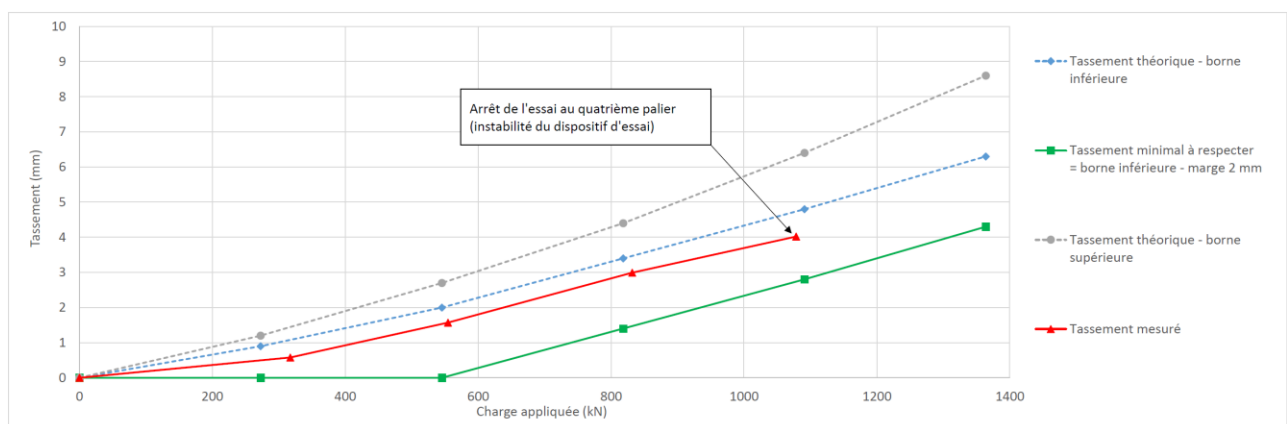


Figure 6. Evolution du tassement propre du micropieu testé – Massif C

On constate, dans les deux cas, un tassement réel des micropieux supérieur au tassement minimal visé, rendant notre solution fonctionnelle.

On note également que le comportement des micropieux était globalement bien approché par l'analyse en fourchette via la méthode de Frank et Zhao, bien que les tassements réels soient alternativement au-dessus de la fourchette haute (massif A) et en-dessous de la fourchette basse (massif C), puisque les écarts de tassement relevés par rapport aux fuseaux théoriques sont de l'ordre du millimètre, unité inusuelle dans le domaine des fondations profondes.

Ces mesures de tassement des micropieux ont donc une nouvelle fois démontré la robustesse de la méthode de Frank et Zhao qui, ici associée à des caractéristiques de sol issues d'essais préalables, a fait ses preuves sur le projet sans faire appel à des modèles numériques (type modélisation aux éléments finis).

#### 4.2. Essais de compression sur appareils d'appui

Chaque appareil d'appui en élastomère fretté a subi un essai de compression avant livraison. Les résultats obtenus sont les suivants :

Tableau 5. Résultats des essais de compression sur appareils d'appui

Appui	Tassement visé (mm)	Tassement mesuré (mm)
A	7	7
B	8	6,5
C	11	13

On constate, sur les massifs A et C, un tassement mesuré supérieur ou égal au tassement visé.

Sur le massif B, bien que le tassement mesuré soit inférieur d'1.5 mm à la valeur seuil visée, il a été décidé en étroite collaboration avec BOUYGUES et le Maître d'Œuvre du projet que ce léger manque de tassement de l'appareil d'appui ne justifiait pas sa reconception.



Figure 7. Photo de l'appui C en cours d'essai de compression

## 5. Conclusion

La singularité de ce projet résidait principalement dans l'obligation d'accroître le tassement des fondations profondes et non de le limiter comme usuellement.

Cette demande particulière a nécessité une réponse spécifique apportée par le Bureau d'Etudes de SOLETANCHE BACHY, nous ayant amenés à revoir la conception en début d'études d'exécution pour proposer cette solution innovante de fondation composite, associant deux techniques toujours utilisées séparément jusqu'ici : micropieux et appareils d'appui en élastomère fretté, en détournant ce dernier de ses attributions habituelles (atténuation des vibrations, réduction des contraintes liées aux séismes, etc.)

La solution mise en œuvre a permis la résolution des problématiques de tassements différentiels d'un Immeuble de Grande Hauteur, tout en réduisant fortement les risques associés.



Figure 8. Massif inférieur en béton armé surplombé de son appareil d'appui (Massif B)

## 6. Références bibliographiques

FRANK R., ZHAO S.R. (1982). Estimation par les paramètres pressiométriques de l'enfoncement sous charge axiale de pieux forés dans des sols fins.