

# RESTAURATION DU GRAND PALAIS : EVALUATION DE LA CAPACITE PORTANTE DE FONDATIONS EXISTANTES

## ASSESSING BEARING CAPACITY OF EXISTING FOUNDATIONS IN THE FRAME OF GRAND PALAIS STRUCTURAL RESTORATION

Martin MARNAS<sup>1</sup>, Soizic KERFONTAIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup> GEOS Ingénieurs Conseils, Rueil-Malmaison, France

**RÉSUMÉ** – La rénovation d'ensemble du Grand Palais induira entre autres la création de planchers ou l'extension de niveaux existants qui seront portés par des appuis nouveaux ou en place. La portance des systèmes de fondations d'appuis existants, consistant en des massifs superficiels, des pieux en bois ou encore en des colonnes de Jet Grouting, a été estimée dans le but d'évaluer leur propension à reprendre des suppléments de charges.

**ABSTRACT** – The deep transformation of rooms and inner spaces within the Grand Palais notably consists in building up floors or extending former ones. Bearing capacity of existing foundations has to be assessed in order to check if these are tailored for carrying added extra loads that intended renovation works will prompt. Focus is especially made on the contribution brought by jet grout columns implemented for foundations strengthening.

### 1. Introduction

Le Grand Palais des Champs-Élysées situé dans le VIII<sup>ème</sup> arrondissement de la ville de Paris fait actuellement l'objet d'importants travaux visant à restaurer l'ensemble de ce monument emblématique de la capitale. La fin des présents travaux est prévue à l'horizon du printemps 2025. Cette campagne de restauration, portée par la RMN-GP (Réunion des Musées Nationaux), est par ailleurs motivée par l'organisation de la prochaine édition des Jeux Olympiques et Paralympiques qui se tiendront à Paris en 2024. A cette occasion, la Nef du Grand Palais ainsi que les galeries accolées accueilleront les épreuves d'escrime et de taekwondo. Ce monument a déjà connu par le passé divers travaux de maintenance. Les fondations des ouvrages en partie Sud ont notamment été renforcées par la mise en œuvre de colonnes de Jet-Grouting (JG).

Le réaménagement des espaces au sein des bâtiments intermédiaires Nord et Sud du Grand Palais nécessite notamment la mise en place de nouvelles files de poteaux sur lesquels s'appuieront les niveaux créés ou étendus. Ces derniers pourront également être supportés par des appuis existants fondés sur des massifs superficiels, pouvant être renforcés par JG.

Afin d'évaluer la propension des fondations existantes à reprendre des suppléments de charges induits, par exemple par la mise en œuvre de nouveaux planchers, des calculs de capacité portante ont ainsi été menés pour les différents systèmes de fondations dont les sollicitations sont amenées à varier. Les fondations déjà confortées par JG ont fait l'objet d'une attention particulière : du fait de la complexité de ces dernières, consistant par endroits en un massif superficiel perché sur des pieux en bois enchevêtrés dans des colonnes de JG, des choix de modélisation ont été entrepris afin de simplifier la démarche calculatoire.

## 2. Description des ouvrages

### 2.1. Contexte géographique et identification du site d'étude

Le Grand Palais des Champs-Élysées s'inscrit dans un contexte urbain particulièrement dense : il se situe dans le VIII<sup>ème</sup> arrondissement de la ville de Paris, sur la rive droite de la Seine. L'extrémité sud du bâtiment est distante d'une centaine de mètres de ce fleuve.

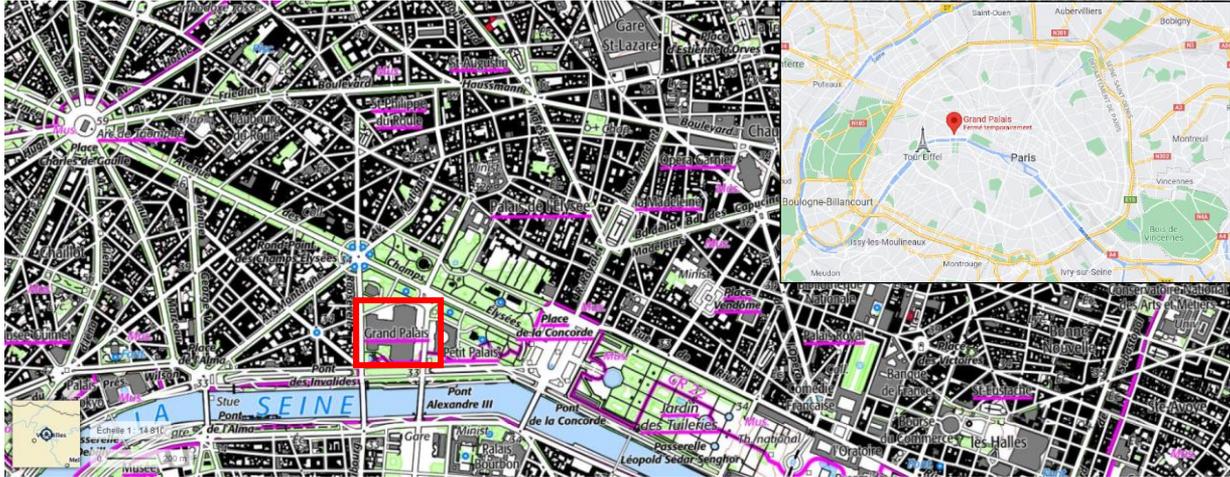


Figure 1. Localisation du Grand Palais – Extrait de carte IGN (source : Géoportail)

Ce monument se décompose en trois organes majeurs que sont la Nef, le bâtiment intermédiaire et le Palais d'Antin qui abrite le musée du Palais de la découverte. Chacun de ceux-ci peut être divisé en différentes zones repérées sur la vue en plan affichée ci-après :

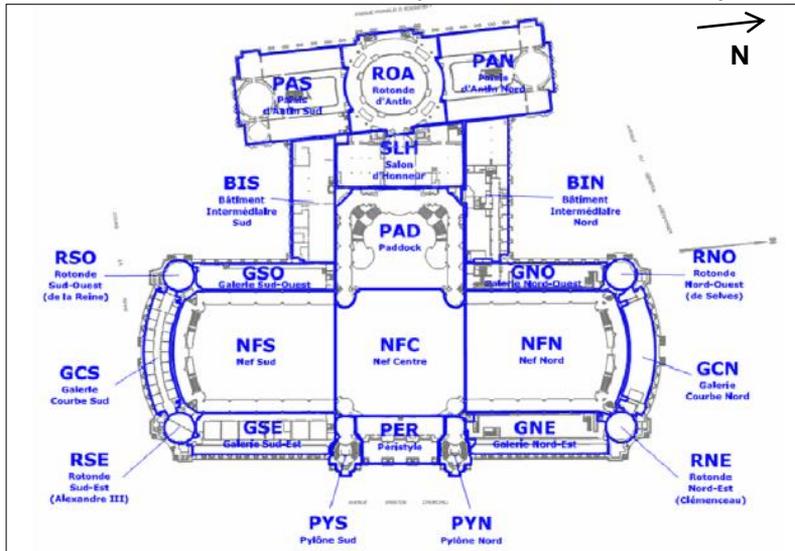


Figure 2. Organisation spatiale du Grand Palais et subdivisions des bâtiments en zones

Les ouvrages de fondations présentés dans cet article sont localisés au niveau des parties nord et sud du bâtiment intermédiaire (nommés BIN et BIS sur la figure ci-avant). La plupart des fondations des appuis de la partie sud du Grand Palais ont été précédemment renforcées lors de travaux d'injections de 2001 à 2003 par l'entreprise Soletanche Bachy.

## 2.2. Fondations des ouvrages existants

### 2.2.1. Bâtiment intermédiaire Sud (BIS)

Les fondations existantes étudiées sont réparties suivant deux files notées A et B repérées sur les extraits des deux vues en plan de la Figure 3.

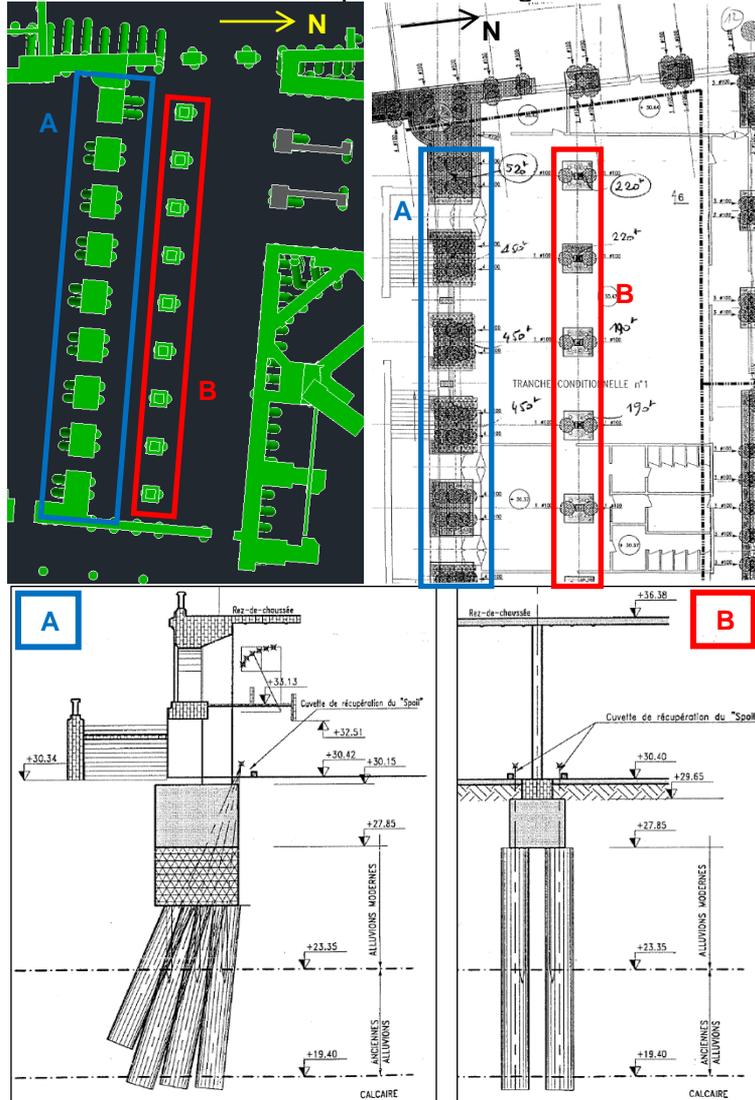


Figure 3. Vues en plan et coupes des files de fondations de la partie Ouest du BIS

Les fondations de la file externe du BIS (file A) consistent en des massifs qui furent initialement fondés sur des pieux en bois de diamètre estimé à 0,2 m, puis renforcés par Jet-Grouting. Six à huit colonnes de JG ont été mises en œuvre au droit de la surface couverte par chaque massif. Chaque massif de JG est organisé en deux files de trois à quatre colonnes. Au sein d'une même file, l'inclinaison des colonnes varie. Les colonnes sont proches les unes des autres au niveau de la base de la fondation sus-jacente. Leurs axes respectifs s'éloignent ainsi lorsque la profondeur augmente. Il est important de préciser que les colonnes montrées sur les coupes sont des représentations simplifiées des volumes de sol impactés par le traitement au JG.

Les semelles de la file B correspondent aux fondations de poteaux en fonte. Chaque semelle était initialement portée par des pieux en bois de diamètre estimé à 0,2 m. De même que pour la file A, chacune de ces fondations a ensuite été confortée par JG.

### 2.2.2. Bâtiment intermédiaire Nord (BIN)

La répartition des fondations, exclusivement superficielles, analysées au sein du BIN fait état de trois files dénommées A, B et C.

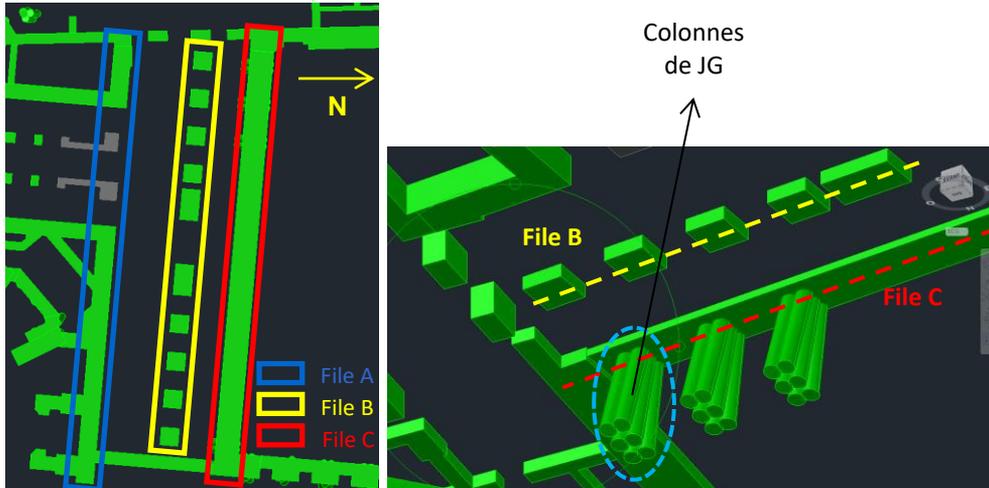


Figure 4. A gauche : vue en plan des files de fondations du BIN – à droite : vue de dessous du système de fondations des appuis de la file C – côté Palais d'Antin

L'alignement de la file B se compose de huit semelles carrées ainsi que de deux autres rectangulaires. Il s'agit des systèmes de fondations de poteaux en fonte ou en béton armé. La file C correspond à une semelle filante courant sur toute la longueur du BIN. Dans la partie Ouest de ce dernier, soit du côté du Palais d'Antin, un renforcement des sols par Jet Grouting (JG) a été opéré au droit de cette semelle. Cela a consisté en l'exécution de trois groupes distincts comprenant chacun six colonnes de JG.

## 3. Modélisation des systèmes de fondations

### 3.1. Contexte géotechnique

La succession lithologique au droit du Grand Palais est renseignée dans le Tableau 1. Sur la base de données recueillies lors de sept campagnes de reconnaissances organisées entre 1965 et 2018, deux modèles sont distingués afin de rendre compte des variations stratigraphiques constatées du nord au sud du bâtiment. Cette distinction permet de mettre en évidence la remontée du toit de la couche des Alluvions Anciennes (AA) au droit des bâtiments localisés dans la partie nord tel que le BIN. Cet horizon fait état de bien meilleurs paramètres pressiométriques que ceux associés à la couche sus-jacente d'Alluvions Modernes (AM). Des différences notables, notamment en termes de pression limite nette  $p_l^*$  sont observées entre ces deux niveaux alluvionnaires. La position de la transition entre ces couches dans l'enchaînement stratigraphique conditionne sensiblement le dimensionnement des fondations des ouvrages.

Tableau 1. Stratigraphies et paramètres pressiométriques

Formation	Base (m NVP)		Classe de sol	$p_l^*$ (MPa)		$E_M$ (MPa)		$\alpha$
	Nord	Sud		Nord	Sud	Nord	Sud	
Remblai (R)	29,5		-	0,3	0,4	2	5	1/2
Alluvions Modernes (AM)	26,0	22,0	Argile, limons	1,1	0,3	10	3	1/2
Alluvions Anciennes (AA)	20,0		Sables, graves	3,1	2,2	26	19	1/3
Calcaire grossier (CG)	14,0	16,5	Marne et calcaire marneux	4,0	3,9	40	43	1/2
Yprésien (Y)	< 6,0	< 7,5	Sables, graves	4,1	4,1	55	59	1/2

Pour ce qui est des fondations profondes, le frottement est négligé dans les formations superficielles que sont les remblais (R) et les Alluvions Modernes (AM).

### 3.2. Hypothèses de vérification des semelle/massifs existants

Les semelles et massifs au droit desquels le sol n'a pas été traité par JG sont assimilés à des fondations superficielles. La capacité portante mobilisée par ces ouvrages est évaluée suivant la méthode pressiométrique décrite dans l'annexe D de la norme NF P94-261.

Les semelles et massifs précédemment renforcés par JG constituent des systèmes de fondations mixtes puisqu'ils intègrent des colonnes de JG et un(e) massif/semelle sus-jacent(e). La portance des sols mobilisée par ces fondations mixtes est évaluée en tenant compte des éléments de fondation prépondérants. Dans ce cas, nous considérons que les charges appliquées sur la fondation sont intégralement transmises et réparties aux colonnes de JG.

En ce qui concerne les semelles/massifs initialement porté(e)s sur des pieux en bois, il est fait abstraction de l'action de ces anciennes fondations profondes en bois pour les calculs de portance. Il est également considéré que l'intégralité des surcharges appliquées aux semelles/massifs sont reprises par les colonnes de JG.

### 3.4 Hypothèses relatives aux colonnes de JG

#### 3.4.1. Travail en compression

Les massifs superficiels n'étant pas forcément liés aux colonnes de JG sous-jacentes, les éléments structurels des systèmes de fondations mixtes peuvent être désolidarisés les uns des autres. Ainsi, les éléments d'un même système interagissent lorsque le massif superficiel est comprimé. Ce n'est en revanche plus le cas lorsque celui-ci est soumis à de la traction. Nous nous focaliserons uniquement sur le comportement en compression des systèmes de fondations.

#### 3.4.2. Géométrie des massifs de JG

Les massifs de JG consistent en un groupe de colonnes dont la disposition géométrique s'avère complexe. En effet, au sein d'un même groupe, les longueurs et les inclinaisons des colonnes varient. Afin de simplifier leur géométrie, celles-ci ont été modélisées comme suit :

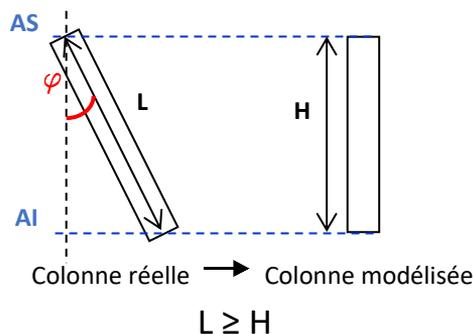


Figure 5. Modélisation géométrique des colonnes

Il a été considéré les simplifications suivantes :

- La contribution des colonnes les plus courtes ancrées dans les Alluvions Modernes (AM) est négligée.
- Bien que les colonnes soient inclinées, il n'est pas tenu compte dans les calculs de la surface projetée sur un plan horizontal de la section à l'arase inférieure. La section droite de cette colonne est considérée, à savoir  $S_{JG} = \pi \cdot \left(\frac{B}{2}\right)^2$ .
- Les colonnes étant proches les unes des autres voire jointives, un effet de groupe est pris en compte, retranscrit à travers la valeur du coefficient d'efficacité  $C_e$  dépendant du nombre de colonnes au sein du groupe, de leur disposition ainsi que de l'entraxe  $d$  séparant leurs axes. C'est l'entraxe minimal  $d_{min}$  estimé entre les colonnes d'un groupe qui est retenu.

### 3.4.3. Calcul de la portance

La justification des colonnes de JG, ici apparentées à des fondations profondes non armées, est réalisée conformément aux recommandations de la norme NF P 94-262. Du fait de leur mise en œuvre particulière, les colonnes de JG ne sont pas classées en tant que pieux pour la détermination du coefficient  $\alpha_{pieu-sol}$  et le facteur de portance  $k_{pmax}$ . Dans les formations traversées par les colonnes, les valeurs de frottement unitaire axial  $q_s$  sont issues d'abaques (Bustamante, 2002).

Le facteur de portance pressiométrique  $k_{pmax}$  est pris égal à 1,0, la plus faible valeur de ce paramètre référencée dans le tableau F.4.2.1 de l'annexe F de la norme NF P94-262, quelle que soit la formation atteinte par la base des colonnes de JG.

Pour la détermination des résistances de pointe  $R_b$  et de frottement axial  $R_s$  propres à une colonne isolée, les valeurs des coefficients de sécurité associés (Bustamante, 2002) sont récapitulées dans le tableau ci-après. Les résistances caractéristiques, notées  $R_{b;k}$  et  $R_{s;k}$ , permettent d'obtenir une charge admissible équivalente à une charge aux ELS

Tableau 2. Coefficients de sécurité retenus pour le calcul de portance

	$R_b$	$R_s$
Coefficient de sécurité	$\gamma_{b;k} = 2$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>\gamma_{s;k} = 2,5</math> sur les 3 premiers mètres de la colonne,</li> <li>- <math>\gamma_{s;k} = 2</math> le long du reste de la colonne</li> </ul>

La portance mobilisée par un groupe de  $n$  colonnes est notée  $R_{c,d}$ .

$$R_{c,d} = \sum_{i=1}^n R_{b;k;i} + C_e \sum_{i=1}^n R_{s;k;i} \quad (1)$$

En tenant compte des simplifications de représentativité de l'ensemble des colonnes d'un même groupe, l'expression (2) se simplifie de la manière suivante :

$$R_{c,d} = n(R_{b;k} + C_e R_{s;k}) = n \left( \frac{R_b}{\gamma_{b;k}} + C_e \frac{R_s}{\gamma_{s;k}} \right) \quad (2)$$

Un ultime facteur de sécurité forfaitairement fixé à 1,4 a volontairement été pris en compte pour le calcul de cette résistance à la compression globale.

### 3.4.4. Résistance intrinsèque des colonnes de JG à la compression

En plus de la capacité portante des terrains mobilisée par chaque colonne de JG, il convient d'évaluer la résistance interne de celle-ci vis-à-vis de la compression. Cette grandeur est à comparer aux charges verticales reprises par les colonnes d'un groupe, suivant l'inégalité suivante :

$$\frac{R_{c,int}}{f_{c,int}} = \frac{q_{c,int} \cdot S_{JG}}{f_{c,int}} = \frac{q_{c,int}}{f_{c,int}} \cdot \pi \left(\frac{B}{2}\right)^2 > Q_{colonne} \quad (3)$$

Avec :

- $q_{c,int}$  : résistance interne à la compression de la colonne de béton de sol ;
- $f_{c,int}$  : coefficient de sécurité pris égal à 3 (Bustamante,2002) ;
- $S_{JG}$  : section de la colonne ;
- $Q_{colonne}$  : charge verticale que doit reprendre la colonne de JG.

La résistance à la compression a été évaluée à partir d'essais de contrôle accomplis sur des carottes extraites des colonnes de JG. Il en est ressorti que les moyennes calculées sur les valeurs de résistance à la compression sont supérieures à 6,0 MPa. Cette dernière valeur a été retenue et divisée par un coefficient de sécurité de 1,5 pour obtenir la valeur à attribuer au paramètre  $q_{c,int}$ . Pour une colonne de diamètre  $B = 1,1 m$ , on en déduit :

$$R_{c,int} / f_{c,int} = \frac{4,0}{3} \cdot \pi \left(\frac{1,1}{2}\right)^2 \approx 1267 \text{ kN}.$$

La charge verticale à laquelle est soumise une colonne au sein d'un groupe est donc prise égale à la DDC divisée par le nombre de colonnes réalisées au droit de la semelle/du massif étudié. Cette répartition équitable revient à supposer que les colonnes d'un groupe ont toutes la même raideur.

#### 4. Résultats des calculs

Les résultats des calculs de capacité portante sont synthétisés dans les tableaux qui suivent, pour chaque appui décrit conformément au § 2.2. Ces valeurs sont comparées aux descentes de charges associées.

##### 4.1. Appuis du Bâtiment Intermédiaire Sud (BIS)

Tableau 3. Capacité portante mobilisée par les colonnes de JG

Appuis	Poteaux de la file centrale B		Appuis existants de la file externe A			
			Appuis intermédiaires	Appui central	Appui à l'extrémité Ouest de la file	Appui à l'extrémité Est de la file
$n$	2		6	6 (+2)	8	6 (+2)
	1 colonne de 7,8 m	1 colonne de 8,5 m				
$C_e.R_{s;k}$ (kN)	59,5	95,5	35,5	19,5	21	19,5
$R_{b;k}$ (kN)	1632,5	1853	1853	1853	1853	1853
Portance du groupe de $n$ colonnes (kN)	$R_{c;d}$	3640,5	11331	11235	14992	11235
	$R_{c;d}/1,4$	2600	8093	8025	10708	8025

Tableau 4. Descentes de charges verticales en pied des appuis

File	$n_{min}$	Charge permanente G (kN)	Charge permanente G' (poids d'un massif) (kN)	Charge variable Q (kN)	DDC (kN)		Charge sur colonne (kN)	
					ELS CARA G+G'+Q	ELU FOND 1,35.(G+G')+1,5.Q	ELS CARA	ELU FOND
A	6	3178,36	1335	442,49	4955,85	6756,78	825,98	1126,13
B	2	611,87	255	878,43	1745,3	2487,92	872,65	1243,96

Les valeurs de résistance à la compression  $R_{c,d}/1,4$  calculées sont supérieures aux intensités des descentes de charges verticales associées à l'ELS Caractéristique ainsi que celles correspondant à l'ELU durable et transitoire. Les charges réparties sur les différents éléments d'un massif de JG sont inférieures à la portance interne  $R_{c,int}/f_{c,int}$  d'une colonne isolée caractérisée par un diamètre de 1,1 m, à l'ELS comme à l'ELU.

#### 4.2. Appuis du Bâtiment Intermédiaire Nord (BIN)

Seule la capacité portante relative aux fondations des poteaux de la file B, pour lesquels des valeurs de descente de charges verticales sont disponibles, est communiquée.

Tableau 5. Capacité portante mobilisée par les semelles sous les poteaux

Appuis		File B	
		Semelle carrées	Semelles rectangulaires
Résistance nette du terrain $q_{net}$ (kPa)		1157	1157
$R_{v,d}$ (kN)	ELU FOND	5020	8739
	ELS CARA	3056	5319

La résistance à la compression  $R_{v,d}$  mobilisée par chaque semelle de la file B surpasse la charge verticale projetée en pied des poteaux en fonte ou en béton armé à l'ELS Caractéristique ( $Q_{v,DDC\ ELS\ CARA} = 2191\ kN$ ) et à l'ELU ( $Q_{v,DDC\ ELU\ FOND} = 3286\ kN$ ).

### 5. Conclusions

L'évaluation de la portance mobilisée par des systèmes complexes, comprenant un massif superficiel, éventuellement perché sur des pieux en bois, qui fut renforcée par le procédé de Jet-Grouting, revient à déterminer la résistance à la compression associée aux éléments de fondation prépondérants que sont les massifs de JG. Le principe de calcul de la capacité portante, similaire à celui suivi pour une fondation profonde, est adapté à partir des abaques et des jeux de coefficients (Bustamante, 2002) établis pour des colonnes de JG.

Une valeur de la résistance structurelle des colonnes de JG a également été estimée, cette dernière restant largement dépendante d'interprétations statistiques faites sur les résultats d'essais de compression sur des carottages de colonnes. L'étude ainsi menée nous a permis de s'assurer que le dimensionnement actuel des fondations existantes, impactées par la rénovation, est suffisant pour reprendre les futures descentes de charges, sans avoir recours à des renforcements. Cette vérification s'appuie sur des campagnes de reconnaissances géotechniques récentes et ciblées au niveau des bâtiments du Grand Palais. Elles ont notamment permis d'établir des modèles géotechniques adaptés pour chaque bâtiment et évaluer les caractéristiques mécaniques des sols de fondations sous l'ouvrage nécessaires aux calculs de vérification des fondations existantes.

### 6. Référence(s) bibliographique(s)

Bustamante M. (2002). Les colonnes de jet grouting : dimensionnement et contrôle (Bearing capacity and integrity control of jet grout columns), Séminaire Franco-Tunisien : Pathologie des sols et fondations – Hammamet, 7-8 février 2002