

CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT DES FONDATIONS D'UN IGH EN MILIEU KARSTIQUE – LE FUTUR PALAIS DE JUSTICE DE PARIS

HIGHRISE BUILDING'S FOUNDATION CONCEPTION & DESIGN IN KARST ENVIRONMENT – NEW PARIS' COURT TOWER CASE STUDY

Alexandre BEAUSSIER¹, Philippe REIFFSTECK²

¹ Terrasol, Lyon, France

² IFSTTAR Marne la Vallée, France

RÉSUMÉ – Sur l'exemple du futur palais de justice de Paris, immeuble de grande hauteur venant s'inscrire dans des terrains minés par le karst gypseux Lutétien, cette étude montre comment les paramètres de foration des sondages destructifs peuvent être un outil adapté à la définition et au dimensionnement des fondations dans un contexte de terrains présentant un comportement aléatoire à l'échelle d'un ouvrage.

ABSTRACT – Based on new Paris' Court Tower case study ; high-rise building in interaction with Lutetian gypsum karst, this paper shows how boreholes' drilling parameters can be used for conception and design of foundation in hazardous geotechnical context.

1. Le futur palais de justice de Paris

1.1. Conception architecturale et structurale

Dans le cadre de la centralisation des institutions juridiques sur un même site, L'Établissement Public des Palais de Justice de Paris (EPPJP) a confié à ARELIA, dans le cadre d'un PPP (Partenariat Public Privé), la maîtrise d'ouvrage du futur palais de justice de Paris (FPJP), au cœur du quartier des Batignolles, dans le 17^e arrondissement de Paris.

D'une surface de planchers utiles de 88 500 m², le bâtiment dessiné par Renzo Piano Building Workshop s'organise selon un plan en « L » sur une emprise au sol d'environ 15 000 m² (figure 1).

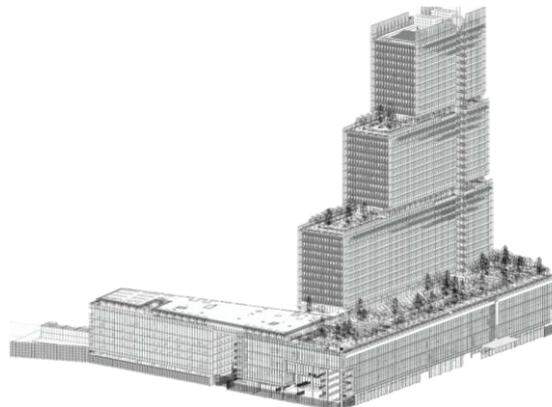


Figure 1. Maquette du futur palais de justice de Paris dessinée par Renzo Piano Building Workshop

Le socle du bâtiment principal s'élève sur 6 niveaux, s'ajustant ainsi sur la traditionnelle cote du plafond haussmannien, et abrite les grands volumes tels que la salle des pas perdus et les 90 salles d'audience.

Au-dessus du socle, une superstructure culminant à 160 m se développe sur 19, 29 et 39 niveaux disposés en trois unités horizontales disposées en gradins. Ces unités, séparées les unes des autres par des terrasses arborées, qui donnent au projet sa ligne « en taille de guêpe » (figure 1), abritent les services juridictionnels et administratifs. A cette architecture de volumes horizontaux, répond un partage vertical de la structure ; les plateaux sont constitués de trois blocs indépendants dotés d'un noyau de contreventement, et séparés par des joints de dilatation verticaux.

Fermant le « L », à l'ouest, le deuxième bâtiment, appelé « Bastion », est constitué de 8 niveaux et regroupe les espaces de détentions des personnes appelées à comparaître. A l'instar du socle, ce bâtiment respecte le plafond haussmannien.

L'ensemble des structures (immeuble de grande hauteur, Socle et Bastion) comprend trois niveaux de sous-sols dont l'arase se situe à la cote 19,7 NVP soit environ 12 m sous le niveau du TN projeté.

1.2. Contexte géologique

Au droit du site, le terrain naturel est aux alentours de la cote 32 NVP. Sous des remblais d'épaisseur variable et conséquente (de 2 à 8 m), les formations sont constituées d'un placage métrique d'alluvions anciennes sablo graveleuses de la Seine, en discordance sur un « substratum » tertiaire d'âge Antéludien.

Dans l'emprise de l'ouvrage, le « substratum » débute par un reliquat de Marno-Calcaires de Saint Ouen du Bartonien. D'épaisseur résiduelle moyenne 3,5 m, cette formation de marnes tendres à cailloutis calcaires présente à sa base un niveau de calcaire raide fracturé et altéré (altération karstique) : le Calcaire de Ducy.

Au-delà, la série Bartonienne continue avec les Sables de Beauchamp, reconnus au droit du site, comme des sables fins noirâtres compacts, d'une épaisseur de 17 m.

Sous les Sables de Beauchamp, sur une épaisseur moyenne de 19 m, sont rencontrées les Marnes et Caillasses du Lutétien supérieur. Dans la zone de l'ouvrage, située au sein du *périmètre de l'arrêté du 25 février 1977*, ces formations sont réputées être le siège d'un karst gypseux : le karst Lutétien.

Sous les Marnes et Caillasses, les Calcaires Grossiers marquent la base du karst Antéludien, ensemble formé des karsts Bartonien et Lutétien. Cette formation compacte a été rencontrée sur une épaisseur de 15 m.

Au-delà est rencontré un cortège sableux compact gris-noir d'une puissance totale de 19 m formé des Sables de Cuise et des Sables Supérieurs.

Ces sables surmontent les formations argileuses Sparnaciennes composées, au droit du site, des Fausses Glaises sur une puissance de 15 m, des Sables d'Auteuil, épisode sableux d'une puissance de 5 m, des Argiles Plastiques présentant une puissance de 6 m, et enfin d'un dernier épisode sableux peu courant dans le stratotype parisien : les Sables Inférieurs du Sparnacien, d'une puissance de 7 m environ.

Le substratum « rigide » débute par les Marnes de Meudon : marnes compactes surmontant la craie Campanienne.

1.3. Contexte hydrogéologique

D'un point de vue hydraulique, l'ouvrage est en interaction avec la nappe Bartonienne baignant les alluvions anciennes, les Sables de Beauchamp supérieurs, et portée par l'horizon médians des Sables de Beauchamp ; ainsi qu'avec la nappe Lutétienne classiquement portée par les formations argileuses Sparnaciennes.

Au droit du site, les deux nappes présentant des charges peu différentes, il a été décidé de retenir une nappe continue baignant l'ensemble des formations. Les niveaux retenus pour le projet sont présentés dans le Tableau 1.

Tableau 1. Niveaux de nappe retenus

Niveaux en absence de remontée générale des nappes parisiennes	EB- Niveau d'étiage	23,3 NVP
	EC- Crue travaux	24,5 NVP
Niveaux dans l'hypothèse d'une remontée générale des nappes parisiennes par arrêt des pompes industrielles et d'infrastructure	EB- Niveau d'étiage	26,5 NVP
	EH- Crue décennale	28,3 NVP
	EE- Crue centennale	28,6 NVP

1.4. Problématiques liées à la conception des fondations

D'un point de vue géotechnique, un des enjeux majeurs de la conception de l'ouvrage est le contrôle des tassements des trois noyaux de l'immeuble de grande hauteur (IGH), qui, en fonction de leur hauteur, descendent des charges conséquentes et assez différentes (respectivement 650, 320 et 215 MN pour les noyaux de 39, 29 et 19 niveaux).

A ces problématiques de tassements différentiels entre noyaux, le système de fondation de l'ouvrage, doit intégrer :

- Les contraintes de tassements des avoisinants de l'IGH, formés par le Socle, le Bastion ainsi que les avoisinants de futur palais de justice ;
- La reprise des sous pressions liées à la présence de sous-sols sous le niveau de nappe ;
- La présence, sous le niveau de base des structures, du karst Lutétien, à l'origine d'aléas tant de réalisation que de fonctionnement et de pérennité des fondations.

2. Qualification de l'aléa karstique

2.1. Origine et caractéristiques du karst gypseux Lutétien

Présent au cœur de la région parisienne, le karst Lutétien est le fruit de la dissolution du corps gypseux des Marnes et Caillasses, dépôt évaporitique lagunaire lenticulaire et discontinu à l'échelle régionale.

A l'instar des mécanismes en jeu dans le développement des karsts calcaires, la dissolution des évaporites se concentre dans les zones d'écoulement (par la mise en contact d'eau non saturée en sulfates avec le gypse), qui, par le développement de macroporosité, auront tendance à se concentrer au niveau des zones de dissolution, entretenant et accélérant les mécanismes de dissolutions... Lorsque les vides de dissolution sont trop importants pour les caractéristiques mécaniques du massif encaissant, le toit du vide s'effondre, remplissant la cavité, dégradant les bancs au-dessus de celle-ci, modifiant les réseaux d'écoulement, et ré-initiant le mécanisme ailleurs.

Ce mécanisme conduit donc, à l'échelle locale, à une forte hétérogénéité des caractéristiques mécaniques au sein des Marnes et Caillasses.

En outre, au vu de la forte solubilité du gypse, les mécanismes de dissolution se produisent à l'échelle de la vie d'un ouvrage, rendant le karst gypseux non seulement aléatoire mais également évolutif.

2.2. Morphologie du karst gypseux Lutétien au droit du site

Le futur palais de justice est situé au sein du périmètre de l'arrêté préfectoral du 25 février 1977, modifié en 1999, périmètre au sein duquel la sédimentation du Lutétien supérieur (Marnes et Caillasses) revêt un caractère évaporitique, créant ainsi un aléa karstique.

Dans ce périmètre, l'Inspection Générale des Carrières (IGC) impose la réalisation d'une reconnaissance minimale des Marnes et Caillasses sur la base de forages destructifs de manière à qualifier l'état d'altération, ainsi que de diagraphies de radioactivité naturelle (RAN) permettant d'appréhender la présence de gypse résiduel, paramètre conditionnant l'évolutivité du karst.

2.2.1. Indices de décompression

Au vu de la quantité de forages destructifs disponibles sur l'emprise de l'ouvrage (133 forages), du caractère ponctuel des reconnaissances, et du caractère aléatoire de la karstification du massif, le premier enjeu de l'analyse est la définition de variables spatiales locales et globales qualifiant et quantifiant l'altération du massif.

En l'absence de fourniture des paramètres de foration sous format numérique, l'analyse de l'altération des Marnes et Caillasses a été faite sur la base des vitesses d'avancement (VA).

Les profils d'enregistrement de paramètres ont été interprétés en terme d'indice de décompression (e) : paramètre adimensionnel défini (Toulemont, 1987) comme rapport entre vitesse d'avancement au sein de l'anomalie et vitesse de chute théorique à la cote de l'anomalie (déterminée par le biais d'essais de chute).

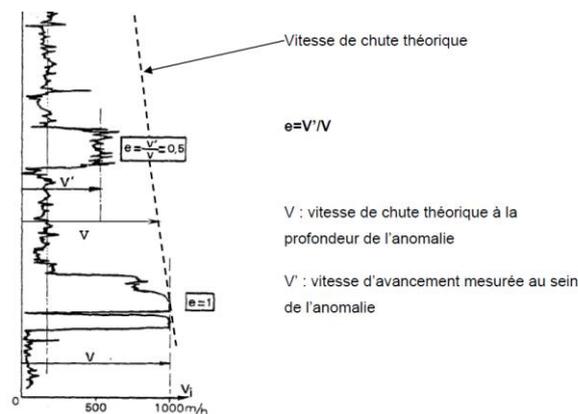


Figure 2. Indice de décompression (e) d'une anomalie (Toulemont, 1987)

En tout point du massif karstique investigué par sondage destructif, cet indice fournit une appréciation de la qualité des terrains. Ainsi, sur la base de cet indice ont été définies cinq classes d'altération des terrains, reportées dans le Tableau 2.

Tableau 2. Classe d'altération sur la base de l'indice de décompression

Classe	Classe 0	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
Indice de décompression	$e < 0,25$	$0,25 \leq e < 0,5$	$0,5 \leq e < 0,75$	$0,75 \leq e < 1$	$e = 1$
Description du matériau	Sain ou très légèrement décomprimé	Peu décomprimé	Décomprimé	Très décomprimé	Vide franc

On notera que l'indice de décompression ne fait pas intervenir la vitesse de foration des matériaux sains. Il s'avère donc plus pertinent pour caractériser les fortes dégradations des matériaux que les légères décompressions. En outre, il ne fait pas

intervenir les pressions sur l'outil et les pressions de retenue, et est donc fortement dépendant du foreur. Toutefois, pour des forages réalisés à la sondeuse géotechnique, machine de faible puissance, ces biais restent acceptables.

2.2.2. Hauteur de vide équivalent

Au droit d'un forage, pour quantifier globalement le degré d'altération d'une couche située entre les cotes a et b on utilisera la *hauteur de vide équivalent* $H_{ve}[a,b]$ définie (Toulemont, 1987) comme la somme des produits de la hauteur des anomalies h_i par leur indice de décompression e_i :

$$H_{ve}[a,b] = \sum_{i \in [a,b]} h_i \cdot e_i \quad (1)$$

2.2.3. Evolution spatiale du karst Lutétien

L'étude de l'évolution verticale de la dégradation mécanique des terrains a été menée visuellement sur la base des 133 logs de classes d'anomalies (Figure 3). Cette analyse a mis en évidence une concentration des zones décomprimées dans les deux tiers supérieurs de la formation, et plus particulièrement dans le tiers central, où sont concentrées les anomalies les plus sévères en terme de degré d'altération et de taille des anomalies. A contrario, le tiers inférieur ne met pas en évidence de propension à l'altération. Ceci a conduit à dissocier les Marnes et Caillasses supérieures présentant un aléa patent de présence de zones altérées et les Marnes et Caillasses inférieures (tiers inférieur de la formation) au sein desquelles cet aléa est faible.

L'analyse de l'évolution latérale de la dégradation mécanique des Marnes et Caillasses a été menée sur la cartographie des hauteurs de vides équivalent calculées, pour chacun des 133 sondages, sur l'ensemble de la hauteur des Marnes et Caillasses (Figure 4). Aucune logique particulière n'ayant pu être mise en évidence à l'échelle de la parcelle, latéralement, l'aléa a été considéré homogène.

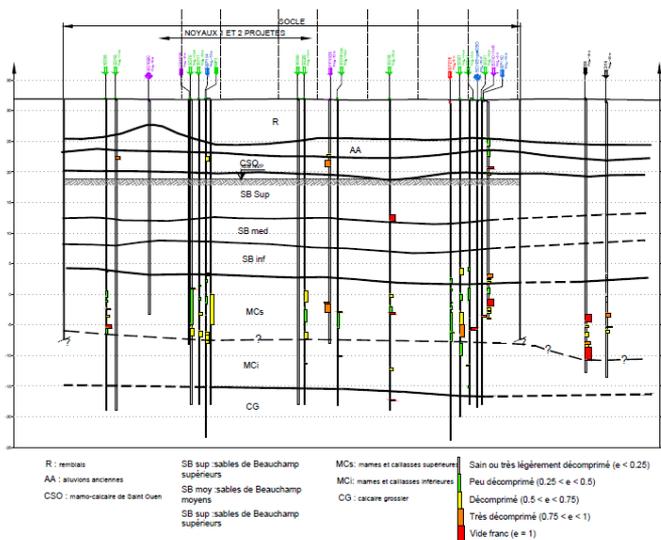


Figure 3. Evolution verticale de la dégradation des Marnes et Caillasses
Logs d'anomalies

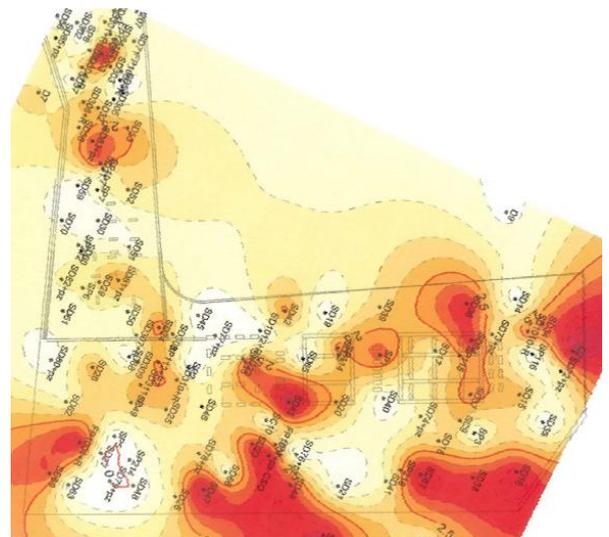


Figure 4. Evolution latérale de la dégradation des Marnes et Caillasses
Hauteur de vide équivalent

2.2.4. Morphologie du karst

Sur la base de l'ensemble des forages de la parcelle ont été étudiées la distribution des hauteurs de vide équivalent au sein des Marnes et Caillasses et celles des hauteurs cumulées d'anomalies en fonction de leur type.

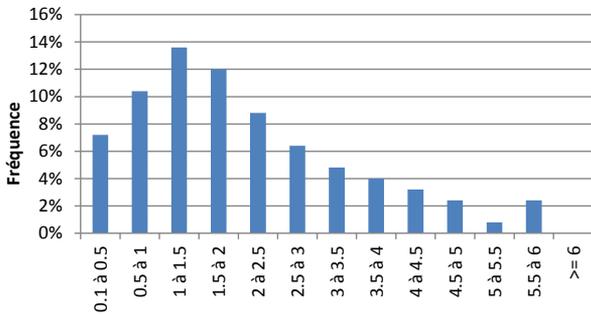


Figure 5. Hauteurs de vide équivalent [m]

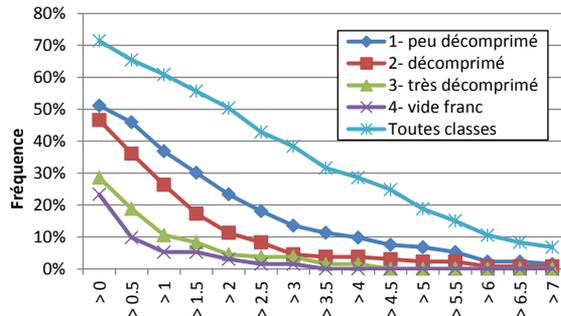


Figure 6. Hauteurs cumulées par type [m]

La distribution des hauteurs de vide équivalent présente une allure de loi normale à log-normale (Figure 5) caractéristique de karsts sénescents à fossiles (Toulemont, 1987). Cette morphologie karstique est cohérente, d'une part, avec les répartitions des hauteurs de vides cumulées par forage (Figure 6), mettant en évidence des anomalies fréquentes mais à des degrés d'altération généralement assez peu poussés et, au contraire, une très faible proportion de vide franc, et d'autre part, avec les diagraphies RAN et l'analyse des sondages carottés qui n'ont révélé du gypse que sous forme résiduelle.

Il apparaît donc qu'au droit de l'ouvrage, le karst présente un faible potentiel d'évolution temporelle. En notant que l'ouvrage projeté n'est pas un ouvrage drainant, l'aléa karstique est donc cantonné à une problématique mécanique et non de dissolution.

3. Définition du principe de fondation

Au vu du caractère imprévisible de l'occurrence karstique à l'échelle de l'ouvrage, la solution retenue doit garantir un fonctionnement optimal sans solutions compensatoires pour l'ensemble des anomalies à forte probabilité d'occurrence, et permettre de pallier, en cas de nécessité, les anomalies exceptionnelles avec un minimum de sujétions en phases travaux.

En notant que, pour une nécessité de reprise des sous-pressions, une fondation sur radier n'était pas envisageable, des fondations profondes ont été retenues pour toutes les structures. Une analyse qualitative de risques conduit naturellement à réduire l'interaction ponctuelle entre fondations et zones pouvant recéler des anomalies, et donc à éloigner les pointes des pieux de la partie supérieure des Marnes et Caillasses.

Associées à un traitement des Marnes et Caillasses par injection de comblement et de clivage selon une maille resserrée par rapport aux recommandations de l'IGC :

- Des fondations sur barrettes descendues dans les Calcaires Grossiers, sous la base du karst Lutétien, ont été retenues pour l'IGH ;
- Des fondations sur pieux Starsol positionnées dans les Sables de Beauchamp *a minima* cinq mètres au-dessus du toit des Marnes et Caillasses ont été retenues pour les structures courantes. Cette garde permet de s'affranchir des phénomènes locaux de réduction de la pointe au droit d'une anomalie potentielle.

4. Définition des paramètres de dimensionnement des Marnes et Caillasses

4.1. Paramètres locaux

En raison du caractère « ponctuel » de la reconnaissance par sondage pressiométrique, de la taille de la sonde, peu adaptée à la caractérisation de terrains variables à l'échelle métrique, et en dépit de leur nombre déjà important et de la richesse de leurs résultats (paramètres de résistance et de déformabilité), les essais pressiométriques n'ont pas été

jugés pertinents pour la définition des paramètres de dimensionnement au sein des Marnes et Caillasses, horizon présentant une forte variabilité.

Aussi, même si les paramètres de foration ne sont pas directement corrélables avec les paramètres de dimensionnement, le parti a été pris de dimensionner les fondations sur la base de ces derniers ; ceux-ci présentant l'avantage d'être enregistrés de manière continue, et d'être disponibles en quantité plus importante. Sur la base des essais pressiométriques réalisés dans les zones d'anomalies, des corrélations entre indice de décompression et pression limite (respectivement modules pressiométriques) ont donc été établies au sein des Marnes et Caillasses au droit du projet (Figures 7 et 8).

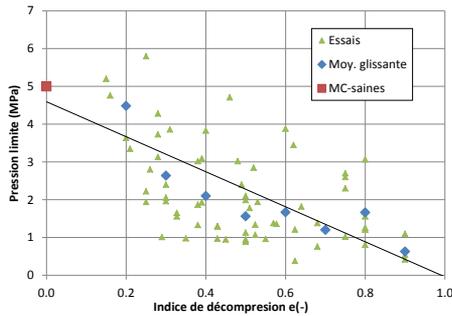


Figure 7. Pression limite en fonction de l'indice de décompression

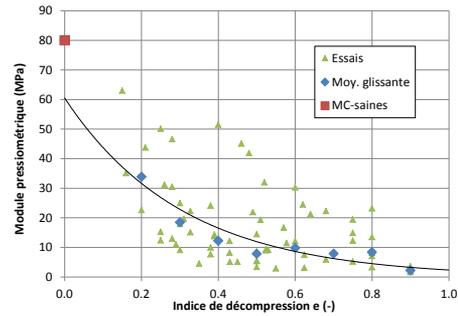


Figure 8. Modules pressiométriques en fonction de l'indice de décompression

Sur la base des corrélations moyennes présentées sur les Figures 7 et 8, et en considérant que conformément aux prescriptions de l'IGC, les terrains traités par injection auront en tout point une pression limite supérieure à 0,6 MPa, les caractéristiques mécaniques résumées dans le Tableau 3 ont été considérées pour chaque classe d'anomalie.

Tableau 3. Paramètres mécaniques retenus en fonction de l'indice de décompression

Classe	Classe 0	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
Indice de décompression	$e < 0,25$	$0,25 \leq e < 0,5$	$0,5 \leq e < 0,75$	$0,75 \leq e < 1$	$e = 1$
E_M [MPa] après injections	80	15	10	3	3
P_L [MPa] après injections	5	2,5	1,5	0,6	0,6
q_s [kPa] après injections (pieu forés boue)	170	150	55	40	40

4.2. Paramètres de dimensionnement

En notant que le principe de fondation retenu permet de limiter les interactions locales entre fondations et Marnes et Caillasses supérieures potentiellement karstifiées, il est possible de définir, sondage par sondage, un module pressiométrique moyen $E_{Meq-MCsup}$ au sein des Marnes et Caillasses supérieures basé : sur la hauteur totale de Marnes et Caillasses supérieures (h_{MCsup}), sur la hauteur cumulée de Marnes et Caillasses identifiées de classe i ($h_{MCsup-i}$), et sur les modules pressiométriques moyens retenus au sein des matériaux de classe i (E_{M-i}) définis dans le Tableau 3.

$$E_{Meq-MCsup} = \frac{h_{MCsup}}{\sum_i \frac{h_{MCsup-i}}{E_{M-i}}} \quad (2)$$

De la même manière ont été définis les frottements axiaux moyens entre barrettes et Marnes et Caillasses supérieures, sur la base des frottements axiaux entre barrettes et Marnes et Caillasses de classe i (q_{S-i}) consignés dans le Tableau 3.

$$q_{S_{moy-MCsup}} = \frac{\sum_i h_{MCsup-i} \cdot q_{S-i}}{h_{MCsup}} \quad (3)$$

In-fine, l'analyse de la distribution des $E_{Meq-MCsup}$ et $q_{S_{moy-MCsup}}$ sur l'ensemble des sondages destructifs sur les Figures 9 et 10 a permis de définir les paramètres de dimensionnement des Marnes et Caillasses supérieures nécessaires aux justifications des fondations de l'ouvrage en terme de déformation et de portance : $E_{Meq-MC_dim} = 25 \text{ MPa}$, $q_{S_{moy-MCsup_dim}} = 135 \text{ kPa}$.

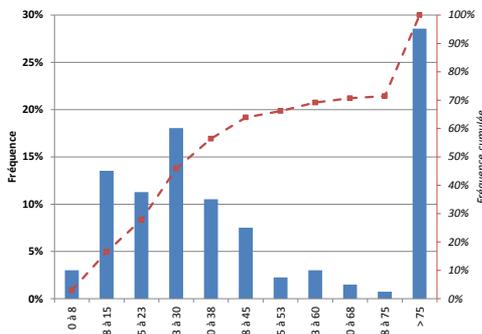


Figure 9. MC_{sup} distribution des modules moyens

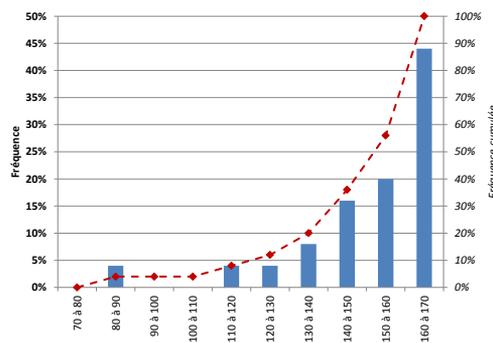


Figure 10. . MC_{sup} distribution des frottements mobilisables moyens

4. Conclusions

Sur l'exemple du futur palais de justice de Paris, ouvrage exceptionnel en forte interaction avec le karst gypseux Lutétien, cette étude montre comment une analyse semi-quantitative des paramètres de foration de nombreux sondages destructifs s'avère un outil adapté à la conception et au dimensionnement des fondations, permettant dans un environnement au développement aléatoire :

- ✓ D'appréhender la morphologie globale du karst, étape préalable nécessaire à la définition d'un projet de fondation qui devra être conçu pour limiter les interactions ponctuelles entre fondations et les anomalies potentielles,
- ✓ De définir, via des corrélations établies localement, un jeu de paramètres de dimensionnement nécessaire à la justification de ce projet de fondation.

En phase travaux, une analyse systématique des paramètres de foration des quelques 650 forages d'injection a été menée pour valider le modèle karstique retenue en études, identifier les potentielles anomalies exceptionnelles, et *in-fine*, valider le dimensionnement de chaque fondation de l'ouvrage.

5. Références bibliographiques

- Inspection Générale des Carrières (2003). Notice technique du 10 janvier 2003. Travaux d'injection des anomalies liées à la dissolution du gypse antéludien. Toulemont M. (1987). Les gypses lutétiens du bassin de Paris. Sédimentation, karstification et conséquences géotechniques. *Rapports des laboratoires*.