

MUSÉE DU LOUVRE : CRÉATION DES ESPACES MUSÉOGRAPHIQUES ET TECHNIQUES DES ARTS DE L'ISLAM

AUTEURS : MARC BENGIO, ROMAIN BRIEU, NICOLAS UTTER - SOLÉTANCHE BACHY,
RUEIL-MALMAISON, FRANCE

LA CONSTRUCTION DU NOUVEAU DÉPARTEMENT DES ARTS DE L'ISLAM AU MUSÉE DU LOUVRE NÉCESSITE LA CRÉATION D'UNE INFRASTRUCTURE À L'APLOMB DES FAÇADES DU LOUVRE. PRÉALABLEMENT À CE TERRASSEMENT POUVANT ATTEINDRE 12 MÈTRES, LA REPRISE EN SOUS-ŒUVRE DES BÂTIMENTS EXISTANTS EST EXÉCUTÉE PAR JET-GROUTING, COMPLÉTÉ PAR UNE INJECTION. LE SOUTÈNEMENT EST CONSTITUÉ DE BÉTON PROJETÉ, ASSOCIÉ À LA MISE EN ŒUVRE DE TIRANTS D'ANCRAGES PRÉCONTRAINTS ET DE CLOUS. UNE DOUBLE APPROCHE DE CALCUL, À LA RUPTURE ET AUX ÉLÉMENTS FINIS, A ÉTÉ NÉCESSAIRE POUR DÉTERMINER LES CONFORTEMENTS À METTRE EN ŒUVRE ET LE PHASAGE DES TRAVAUX.

Avec 18 000 œuvres, le musée du Louvre possède l'une des collections les plus importantes au monde dans le domaine des Arts de l'Islam.

Afin de pouvoir exposer ce trésor au sein du musée du Louvre, les nouveaux espaces du département des Arts de l'Islam se développeront sur 6 450 m². Ce projet d'envergure, conçu par les architectes Rudy Ricciotti et Mario Bellini, est un véritable défi architectural car il doit s'intégrer sans violence dans la cour Visconti qui, jusqu'à ce jour, n'était pas accessible au public. Le projet s'étend également dans l'aile Daru. Il multipliera par quatre la surface d'exposition tout en respectant le parcours muséographique. Les nouveaux espaces seront recouverts par un voile lumineux discrètement diffusant, flottant délicatement sur la muséographie (photo 2).

Le principe conducteur du projet est donc d'intégrer cet espace supplémentaire dans le site du Louvre sans en altérer la beauté. Par conséquent,

il ne s'agit pas de créer un édifice en superstructure, mais au contraire d'enterrer l'ouvrage pour préserver la vue sur l'extérieur qui sera offerte aux visiteurs depuis les salles d'exposition. Pour intégrer le projet, il est prévu de terrasser la cour Visconti sur 12 m de profondeur, la galerie Daru sur 8 m et de construire en remontant un niveau technique, un parterre, une mezzanine et un rez-de-cour.

Dans cette opération, Soletanche Bachy intervient pour conduire les études et réaliser les reprises en sous œuvre et les soutènements, en groupement avec la société Lainé Delau qui construira le Gros Œuvre.

Les travaux comprennent pour l'essentiel : des travaux préparatoires de protections de l'existant, les travaux de création des sorties de secours, des ouvrages d'assainissement, les reprises en sous-œuvre des bâtiments et des ouvrages existants, le terrassement et le soutènement des fouilles, le gros œuvre des futurs espaces muséographiques.

LA REPRISE EN SOUS-ŒUVRE

Les travaux de reprise en sous-œuvre s'articulent principalement autour des techniques du jet-grouting et de l'injection.

Quatre cent colonnes de jet-grouting (figure 3) réalisées en jet simple de 1,40 m à 1,60 m de diamètre viennent reporter les charges verticales des façades sur les marnes et caillasses et le calcaire grossier situés entre 6,00 et 8,00 m de profondeur.

L'étanchéité de la fouille est assurée par le rideau des colonnes de jet au droit des alluvions, prolongé par une jupe injectée à 18 m de profondeur dans le calcaire. 200 forages injectés au coulis de bentonite ciment constituent cette jupe.

Compte tenu de la géométrie complexe du projet, et pour s'assurer de la bonne jonction des colonnes (notamment dans les angles de la fouille) ainsi que de la bonne fermeture du voile injecté, les plans de tir des forages ont été mis au point à partir d'une étude en trois dimensions (figures 4 et 5).

TERRASSEMENTS, BÉTON PROJETÉ, ANCRAGES

Les soutènements provisoires sont des voiles en béton projeté, réalisés par passes descendantes de 1,30 m dans les alluvions et de 1,50 m dans le rocher. Ils occupent une surface totale de 3 700 m². Ces voiles de 0,20 m d'épaisseur sont retenus en tête par 150 tirants précontraints de 600 à 900 kN et par 850 clous répartis sur toute la hauteur terrassée.

Dans les zones recevant peu de charges verticales, le radier définitif est ancré par des micropieux pour assurer la stabilité à la sous-pression de la nappe.

REPRISE DES POTEAUX AILE DARU

Dans l'aile Daru, le terrassement est réalisé sous les poteaux. Des poutres moisantes reportant les charges sur les fondations des façades sont coulées au préalable. Les appuis sont renforcés avec des micropieux. Les poutres sont ensuite vérinées (photos 6a, 6b et 6c).



1
© LUC BENEVELLO-PHOTOOTHÈQUE VINCI



UN ENVIRONNEMENT SENSIBLE

Il s'agit d'un chantier très délicat, dans l'un des plus beaux musées du monde, avec des façades ou ouvrages existants classés monuments historiques.

Les travaux se déroulent dans l'aille Denon qui est la partie la plus visitée (95 % des visites) du Louvre en raison de la présence de la Joconde (au deuxième étage de l'aille du Manège), du célèbre tableau de David « Le sacre de Napoléon » (au deuxième étage de l'aille Daru) et de la Vénus de Milo. Cette partie du Louvre reste en activité pendant les travaux. Dans ce contexte, le moindre mouvement de l'existant pendant les travaux, doit être non seulement surveillé mais faire l'objet d'actions correctives immédiates pour ne pas dépasser les tolérances fixées au contrat.

SolData équipé plus d'une centaine de cibles, scrutées 24 heures sur 24 par 2 théodolites motorisés « Cyclops », informant en temps réel des moindres mouvements des façades de la cour Visconti et de l'intérieur de l'aille Daru

1- Travaux en cours.
2- Aménagement futur.

1- Work in progress.
2- Future development.



avec une précision de 0,5 mm à 60 m de distance.

NATURE DU SOUS-SOL

Les travaux sont réalisés depuis le niveau du dallage situé à 31,20 NGF. Les différentes campagnes de sol et notamment les campagnes de sondages complémentaires exécutées par Arcadis en 2006 et 2007, montrent le toit du substratum rocheux constitué par les calcaires du Lutétien peu variable.

Les alluvions anciennes recouvrent le massif calcaire plus ou moins marneux en tête. Les sables de l'Yprésien situés vers la cote 8,00 NGF s'étendent largement en dessous du fond de fouille du projet.

Au droit de la cour Visconti, se succèdent depuis la surface, les remblais sur 3,00 m maximum d'épaisseur, les alluvions anciennes de 3,00 à 5,00 m d'épaisseur, les marnes et caillasses peu épaisses puis le calcaire grossier.

Le toit du substratum évolue entre 24,65 et 25,30 NGF.

Les caractéristiques mécaniques sont déduites des essais pressiométriques principalement issus des dernières campagnes de reconnaissance.

Les moyennes arithmétiques des caractéristiques (Module pressiométrique E & Pression limite PI) sont reportées dans le Tableau 1 selon la campagne d'exécution.

La nappe phréatique des alluvions est fortement alimentée par la Seine en période de crue.

En période normale elle baigne tout juste les alluvions.

Elle est très influencée par les pompages du Louvre.

Les niveaux de nappe retenus dans ce projet figurent au Tableau 2.

Les sondages de reconnaissance dans les maçonneries montrent des fondations proches de la surface (figure 7).

Les piliers de façade sont posés sur un gros béton filant. Les niveaux d'assise des fondations sont récapitulés au Tableau 3.

DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT DES OUVRAGES

Le jet-grouting

Les colonnes de jet sont implantées sous les murs périphériques de la fouille. Ces colonnes descendent dans les marnes et caillasse et permettent de reporter les charges verticales sur le substratum en limitant leur influence sur les soutènements.

Dans les alluvions, l'aspect massif recherché sera en général effectif du fait du recouplement des colonnes entre elles. La résistance à la compression moyenne, prise en compte pour définir les paramètres de cisaillement du jet, est de 3 MPa. La résistance à la compression du coulis prélevé dans les colonnes de jet est au moins égale à 6 MPa.

Dans la zone marneuse (marnes et caillasse) trop résistante pour espérer créer des colonnes de diamètre constant, l'amélioration est obtenue grâce à l'action du jet dans les fissures

et les zones de remplissage argileux. Les zones d'ombre non traitées par le jet sous les gros piliers sont traitées par injection de coulis de ciment de manière à homogénéiser le massif de reprise.

Le taux de travail à la base des piliers varie entre 0,5 et 1 MPa. Le massif de jet agit en répartissant les charges entre deux piliers. En tenant compte de cette répartition, des poids propres et de l'incidence des diverses réactions (tirants d'ancrage, etc.), les contraintes maximales dans le massif de jet n'excèdent pas 1,2 MPa.

Les soutènements

La stabilité des voiles en béton projeté est assurée grâce à un lit de tirants précontraints situé vers la cote 30,00 NGF non loin de la base des fondations (figure 8).

Les tirants précontraints ont pour but de limiter les déplacements en tête du massif de jet soumis à la poussée des terres, et la poussée induite par les piliers de façade. Ils s'appuient sur des

liernes métalliques plaquées contre les fondations. La puissance de précontrainte nécessaire est variable en fonction des charges et de la profondeur de la fouille. Les soutènements sont stabilisés ensuite par des niveaux de clous d'ancrage constitués par des barres en acier haute adhérence scellés dans le terrain par Injection Globale et Unitaire. Les tirants actifs sont constitués de torons type T15,7 de 150 mm² de section (classe 1880 MPa limite élas-

tique 248 kN). Les tirants, provisoires, travaillent à 0,75 fois la limite élastique. Les clous sont constitués par des barres en acier de limite élastique 500 MPa filetées. Les diamètres utilisés sont 25, 32, 40 et 50 mm.

Les têtes de clous sont noyées dans le voile en béton projeté qui comporte 2 lits de treillis soudés.

Un dispositif drainant est prévu entre le parement terrassé et le béton projeté dans les zones baignées par la nappe phréatique.

Les piliers entre la cour Visconti et l'aile Daru sont habillés par un voile en béton projeté et armés de barres horizontales de type Dywidag.

Le voile d'injection

Ce voile mono-linaire a pour but de limiter les venues d'eau par le massif calcaire, en traitant les zones de forte fissuration. Il descend 5,00 m sous le fond de fouille. Il est réalisé dans le prolongement des colonnes de jet, qui assurent elles aussi un rôle d'étanchéité.

3- Vue en plan.

4- Modèle en trois dimensions.

5- Coupe du projet.

3- Plan view.

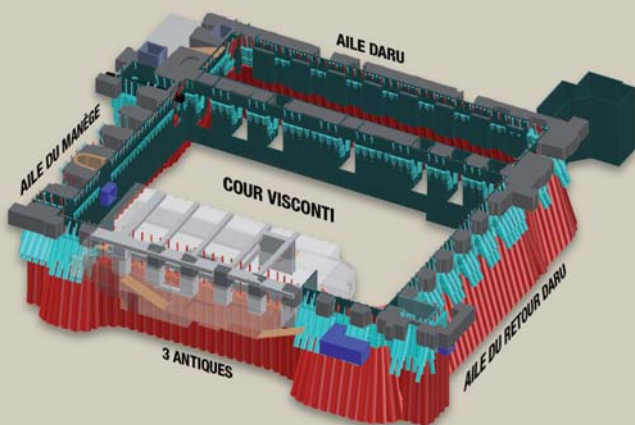
4- Three-dimensional model.

5- Cross section of the project.

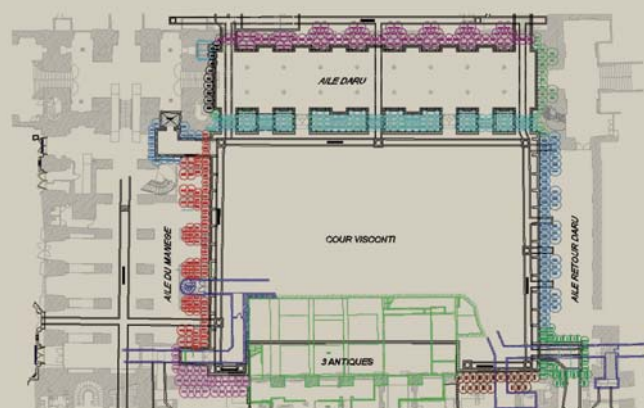
PHASAGE DES TRAVAUX

- Réalisation des colonnes de jet-grouting.
- Mise en œuvre du voile injecté dans le prolongement des colonnes de jet.
- Traitement complémentaire par injection au droit des fondations.
- Travaux d'enserrement des poteaux mis à nus (barres et béton projeté) au fur et à mesure des terrassements.
- Terrassement vers la base des fondations maçonnées.
- Confection des liernes métalliques pour tirants.
- Réalisation des tirants d'ancrage précontraints appuyés sur liernes.
- Terrassement par phase jusqu'au fond de fouille.
- Réalisation des clous par phase.
- Mise en œuvre du béton projeté par phase.
- Réalisation des micropieux de radier.

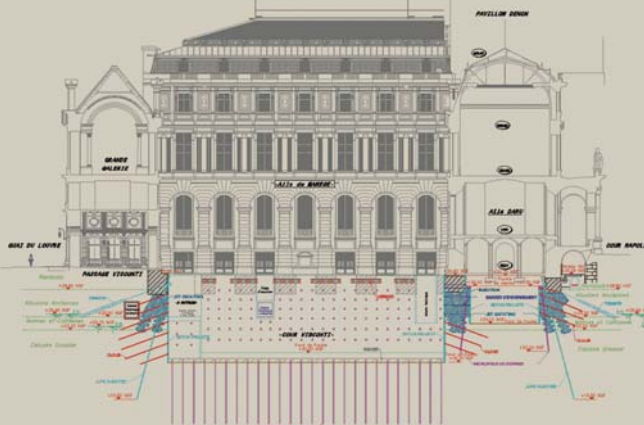
MODÈLE EN TROIS DIMENSIONS



VUE EN PLAN



COUPE DU PROJET





6a

© DR



6b



6c

Les micropieux de radier

Les radiers à stabiliser sont scellés dans le calcaire.

Les sous-pressions importantes et le manque de poids de la structure justifient la nécessité d'accrocher les radiers à des micropieux assurant le rôle de tirants passifs.

La tête de micropieu est noyée dans le radier. Le nombre de micropieux, disposés selon une maille carrée, est limité par le marché à 6 unités par 100 m² pour limiter au maximum la traversée de l'étanchéité.

6a, b & c- Aile Daru - reprise des poteaux.

6a, b & c- Daru wing-underpinning the columns.

JUSTIFICATION DE LA STABILITÉ À LA RUPTURE SUR TALREN

Les calculs sont conduits à l'aide du programme Talren (figure 9) mis au point par la société Terrasol.

Le programme calcule, pour des surfaces de ruptures imposées, le coefficient de sécurité minimum associé à la

combinaison choisie. La combinaison respecte les règles de Clouterre selon la méthode des coefficients partiels.

La justification est effectuée aux ELU en recherchant les caractéristiques géométriques et résistantes des renforcements produisant un coefficient de sécurité minimum de 1.

La méthode Bishop avec les paramètres pondérés de Clouterre en combinaison fondamentale courante a été retenue.

Les surfaces de glissement étudiées sont planes pour respecter la nature des matériaux affectés.

Dans le rocher ou le jet, les ruptures ne sont pas circulaires.

Au fur et à mesure des terrassements, les renforcements (tirants et clous) sont activés. Les piliers de façade sont modélisés par des charges verticales uniformes.

Le jet-grouting est modélisé par un massif de sol aux caractéristiques mécaniques déduites de la résistance à la compression.

Le toit de la frange marseuse améliorée par le jet est également modélisé ainsi que la nappe phréatique. ▷

TABLEAU 1 : CARACTÉRISTIQUES RETENUES

Couches	E MPa	PI MPa	α
Remblais	2	0,2	0,50
Alluvions	50	2,5	0,33
Frange marseuse	20	1,5	0,50
Calcaire grossier	150	5	0,50

TABLEAU 2 : NIVEAUX DE NAPPE PHRÉATIQUE

Situation	Nappe basses eaux	Nappe hautes eaux	Nappe eaux exceptionnelles	Nappe calcul en service
Daru Visconti	23,70	25,40	26,30	26,80
Visconti	23,70	26,10	27,20	27,70
3 Antiques	23,70	26,80	28,10	28,60

TABLEAU 3 : NIVEAUX D'ASSISE DES FONDATIONS

Façade	Base des pierres	Base du gros béton
3 Antiques	28,50	28,00
Aile du Manège	30,00	28,00
Aile Daru	30,00	28,00
Aile Retour Daru	30,00	28,00

TABLEAU 4 : CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES SOLS PRISES EN COMPTE DANS LES CALCULS

Couches	γ [kN/m ³]	γ' [kN/m ³]	Φ [°]	C [kPa]
Remblais	18	10	30	0
Gros béton	21	11	38	30
Alluvions	20	11	35	0
Jet-grouting	22	12	33	400
Frange Marseuse	21	11	25	50
Frange marseuse améliorée par le jet	22	12	35	200
Calcaire	21	11	35	200

TABLEAU 5 : MODULES DE DÉFORMATIONS

Couches	E ₅₀ (MPa)	E _{ur} (MPa)
Remblai	8	16
Alluvions	300	600
Frange altérée	80	160
Calcaire	600	1200
Jet	900	1800
Frange améliorée	400	800

TABLEAU 6 : DÉFORMÉES THÉORIQUES AILE DU MANÈGE

Type de déformation	Cas N°1	Cas N°2	Cas N°3
Tassement en surface	11 mm	8 mm	7 mm
Déplacement horizontal	8 mm	7 mm	6 mm

TABLEAU 7 : DONNÉES GÉOTECHNIQUES AILE DU MANÈGE

Couches	PI. MPa	E MPa
Alluvions	4	90
Calcaire grossier	5	500

TABLEAU 8 : CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES MESURÉES DU JET-GROUTING

Rc (MPa)	E (MPa)	E/Rc	Sol
10,2	16602	1628	alluvions
10,6	11236	1060	alluvions
5,6	4865	869	marno-calcaire
9,1	12143	1334	alluvions

Pour chaque surface de rupture étudiée, sont calculés les efforts dans les tirants et clous. Les efforts maximaux servent à dimensionner le voile en béton projeté.

Les caractéristiques mécaniques des renforcements et les taux de frottement limites des scellements issus des essais préalables sont des données de calcul.

APPROCHE DES DÉFORMATIONS SUR PLAXIS 2D

L'approche des déformations du sol sous les fondations et du soutènement en béton projeté cloué est conduite au droit de l'Aile du manège la plus chargée à l'aide du programme Plaxis D2.

Le modèle de comportement retenu est le modèle de sol avec écouvissage (Hardening Soil Model). Il est construit avec les paramètres de rigidité indiqués au Tableau 5.

Toutes les phases de travaux sont prises en compte, depuis la construction du Louvre. L'approche des déformations est étudiée en faisant varier les caractéristiques du jet et de la frange marnieuse améliorée.

Trois combinaisons ont été étudiées (figure 10) :

- Jet $E_{50} = 900$ MPa ;
Frange améliorée = 80 MPa.
- Jet $E_{50} = 1\ 800$ MPa ;
Frange améliorée = 600 MPa.
- Jet $E_{50} = 900$ MPa ;
Frange améliorée = 200 MPa.

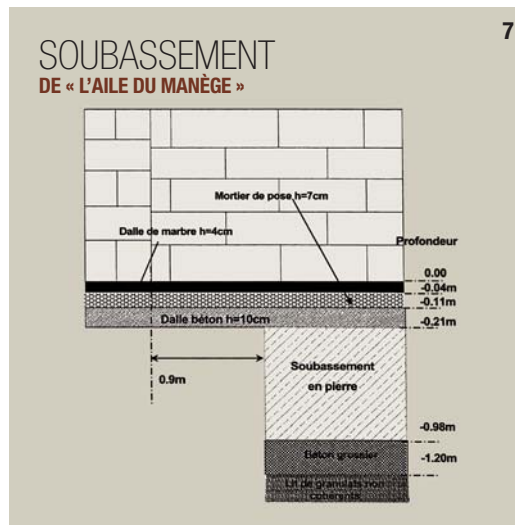
Le champ de répartition des contraintes montre que le massif de jet reste entièrement comprimé et que des effets voûtes se développent (figure 11).

La contrainte maximale est de 820 kPa (diagramme selon une coupe verticale située à l'aplomb de la façade). Cette valeur est à comparer à la résistance à la compression des colonnes de jet. Le coefficient de sécurité est égal à 7,3. Dans l'axe du pilier de façade, on peut supposer une concentration des contraintes dont la valeur serait au maximum 1 180 kPa. Dans ce cas, le coefficient de sécurité est proche de 5. L'étude de l'évolution du tassement au droit de la façade (figure 12) ainsi que de la déformation horizontale (figure 13) en fonction des phases de terrassement a permis de valider le principe de confortement retenu.

L'approche PLAXIS 2D a permis d'obtenir un ordre de grandeur des déformations variant de 5 à 10 mm.

SUIVI GÉOTECHNIQUE

L'exploitation des mesures effectuées au cours des travaux a permis de mener une rétro-analyse.



Les résultats de l'analyse effectuée sur la zone de l'Aile du manège sont présentés au Tableau 6.

Les déformations attendues au droit du pilier de façade étaient, en fonction des hypothèses faites sur le module d'Young du jet-grouting, et de la frange améliorée (cf. supra).

Les déformées constatées sont de l'ordre de 2 millimètres.

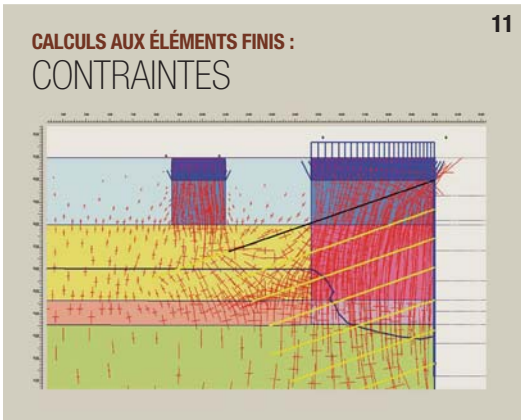
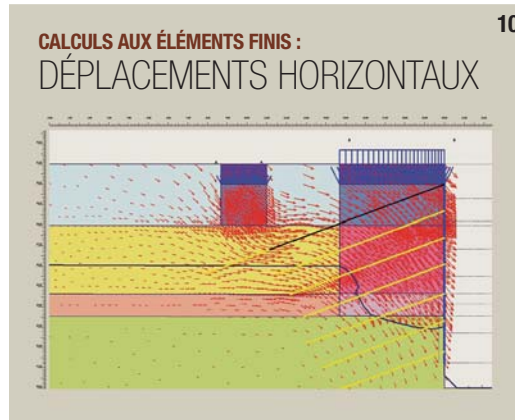
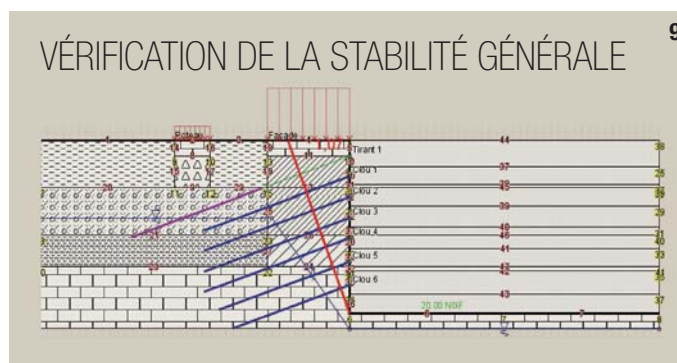
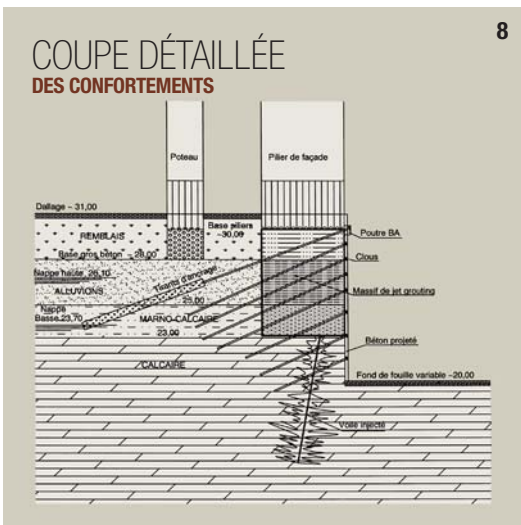
La première étape du recalage consiste à retenir, pour l'analyse, le sondage le plus proche (PR2).

Sur la base de ce sondage, les valeurs figurant au Tableau 7 ont été retenues. À noter que la frange altérée n'est

pas perceptible dans le sondage PR2. En ce qui concerne le jet-grouting, nous disposons de 360 essais de compression à 28 jours et 3 essais de mesure du module de déformation sécant.

Nous retenons :

- Pour le jet-grouting dans les alluvions :
 $R_c = 10$ MPa,
 $E/R_c = 1\ 000$,
Esécant = 10 000 MPa.
- Pour le jet-grouting dans la frange marnieuse :
 $R_c = 5$ MPa,
 $E/R_c = 1\ 000$,
Esécant = 5 000 MPa.



7- Soubassement de « l'aile du manège ».

8- Coupe détaillée des confortements.

9- Vérification de la stabilité générale.

10- Calculs aux éléments finis : déplacements horizontaux.

11- Calculs aux éléments finis : contraintes.

7- Basement of the «Aile du manège» wing.

8- Detailed cross section of consolidation.

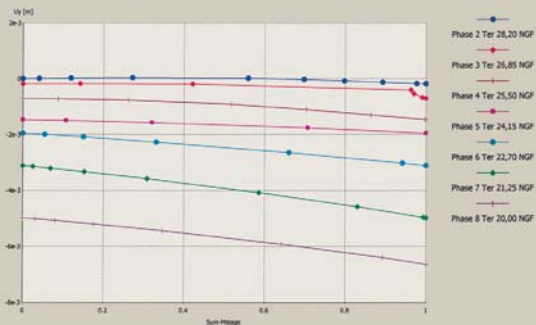
9- Check on overall stability.

10- Finite-element calculations: horizontal displacement.

11- Finite-element calculations: stresses.

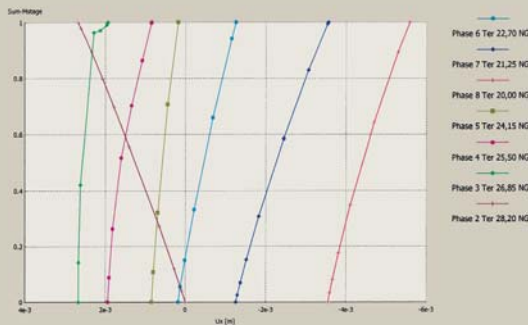
ÉVOLUTION DU TASSEMENT THÉORIQUE

12



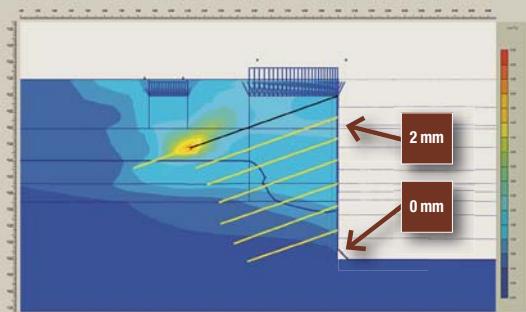
ÉVOLUTION DE LA DÉFORMATION HORIZONTALE

13



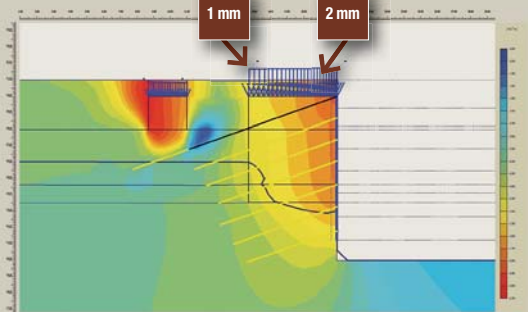
RÉTRO-ANALYSE DÉFORMATIONS HORIZONTALES

14



RÉTRO-ANALYSE DÉFORMATIONS VERTICALES

15



12- Évolution du tassement théorique.

13- Évolution de la déformation horizontale.

14- Rétro-analyse ; déformations horizontales.

15- Rétro-analyse ; déformations verticales.

12- Evolution of theoretical subsidence.

13- Evolution of horizontal deformation.

14- Reverse engineering; horizontal deformation.

15- Reverse engineering; vertical deformation.

Dans la frange améliorée nous considérons une moyenne entre le jet-grouting et la marnage calcaire soit :

$E_{50} = 2\ 540\ \text{MPa}$, valeur limitée à celle du calcaire grossier soit $2\ 000\ \text{MPa}$.

Enfin, nous prenons en compte les charges précises appliquées au profil concerné.

La prise en compte du phasage complet des travaux a permis de retrouver l'ordre de grandeur des déformées mesurées (figures 14 et 15). Il n'a pas été nécessaire de modifier d'autres paramètres géotechniques.

CONCLUSION

La conception de la reprise en sous-œuvre a nécessité la combinaison de calculs à la rupture et de modélisa-

tion aux éléments finis. L'approche en fourchette retenue a permis de valider le dimensionnement des éléments de reprise en sous-œuvre (clous, tirants, jet-grouting), et de fournir les données d'entrée nécessaires à la mise en œuvre de la méthode observationnelle, indispensable sur ce type d'ouvrage, eu égard à la difficulté du projet et la sensibilité de l'environnement.

La rétro-analyse effectuée à partir du comportement réel de l'ouvrage a permis, en considérant les caractéristiques mécaniques mesurées sur le jet-grouting, de valider la pertinence du modèle géotechnique retenu.

Les travaux se sont déroulés de façon parfaitement normale, et n'ont engendré aucun désordre. □

ABSTRACT

LOUVRE MUSEUM – CREATION OF MUSEOGRAPHIC AND FUNCTIONAL AREAS FOR ISLAMIC ART

SOLETANCHE BACHY; MARC BENGIO, ROMAIN BRIEU, NICOLAS UTTER

The construction of the new department of Islamic Art in the Louvre Museum required the creation of an infrastructure directly below the facades of the Louvre. Prior to these earthworks, as much as 12 metres deep, underpinning of the existing buildings was performed by jet grouting, supplemented by injection. The retaining structure is formed of shotcrete, together with the installation of prestressed anchor ties and studs. A twofold computation approach, by the ultimate design and finite element methods, was needed to determine the consolidation to be applied and the work phasing. □

MUSEO DEL LOUVRE – CREACIÓN DE ESPACIOS MUSEOGRÁFICOS Y TÉCNICOS DE ARTE ISLÁMICO

SOLETANCHE BACHY; MARC BENGIO, ROMAIN BRIEU, NICOLAS UTTER

La construcción del nuevo departamento de Arte Islámico en el museo del Louvre requiere la creación de una infraestructura en la vertical de las fachadas del Louvre. Previamente a este movimiento de tierras que puede alcanzar 12 metros, los recalces de los edificios existentes se realizan mediante la técnica jet-grouting, completada con una inyección. La contención está constituida por hormigón proyectado, asociado con la colocación de tirantes de anclaje pretensados y clavos. Se necesitó un doble estudio de cálculo para la ruptura y los elementos acabados con objeto de determinar las consolidaciones que se debían realizar y la planificación de las obras. □

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRISE D'OUVRAGE : Établissement Public du Musée du Louvre

MAÎTRISE D'ŒUVRE :

- Mario Bellini et Rudy Ricciotti, architectes
- Renaud Pierard, architecte muséographe
- BERIM, bureau d'études techniques

ENTREPRISES : Groupement Lainé Delau / Soletanche Bachy France