



Maître d'Ouvrage

DRE Auvergne / Service Maîtrise d'ouvrage

DRE Auvergne / SMO
7 rue Léo Lagrange
63033 Clermont Ferrand

Approuvé par
le maître d'ouvrage

RN 88 **Contournement du PUY EN VELAY**

Opération n° 03 Q 43 A

VIADUC DE TAULHAC

Dossier de consultation des opérateurs économiques

2-2.6 - Note de calcul des appuis et des fondations

Maître d'Ouvre

DIR Massif Central / Service Ingénierie Routière du Puy

DIR MC / SIR
18 rue Jean Solvain
43000 Le Puy en Velay

Etabli et présenté par
le maître d'oeuvre

Date :

Direction Régionale de l'Équipement Auvergne
7 Rue Léo Lagrange
63033 CLERMONT-FERRAND

Direction Interdépartementale des Routes
Service d'Ingénierie Routière
18 rue J Solvain
43012 LE PUY EN VELAY CEDEX

RN 88 — Contournement du Puy en Velay

Solution Mixte

2.2.6 — N.d.C des appuis et des fondations

Mai 2009

Centre d'études Techniques de l'équipement de Lyon

Département Infrastructures et Transports
46, rue Saint Théobald BP 128 – 38081 l'Isle d'Abeau Cédex
tél : 04 74 27 53 00 / fax : 04 74 27 68 75
EQ-CT69-DIT--09-10--FR

Chef de projet : Arnold BALLIERE

Responsable de domaine : Renaud LECONTE

Auteurs de l'étude : Arnold BALLIERE - Christophe HERBERT

Sommaire

Sommaire.....	3
Introduction.....	4
1 Objet de la note.....	4
2 Règlements de calculs.....	4
3 Etude géotechnique.....	4
3.1 Coupe géologique.....	4
3.2 Sondages.....	5
Appareils d'appui.....	6
1 Appareils d'appui.....	6
2 Efforts verticaux.....	6
3 Efforts horizontaux.....	7
4 Souffle des joints.....	8
Fondations des appuis.....	9
1 Pile P1.....	9
1.1 Etude de sol au droit de P1.....	9
1.2 Fondations envisagées.....	10
1.3 Justifications des fondations.....	10
2 Pile P2.....	14
2.1 Etude de sol au droit de P2.....	14
2.2 Fondations envisagées.....	15
2.3 Justifications des fondations.....	15
3 Pile P3.....	19
3.1 Etude de sol au droit de P3.....	19
3.2 Fondations envisagées.....	20
3.3 Justifications des fondations.....	20
4 Pile P4.....	24
4.1 Etude de sol au droit de P4.....	24
4.2 Fondations envisagées.....	25
4.3 Justifications des fondations.....	25
5 Culée C5.....	29
5.1 Etude de sol au droit de C5.....	29
5.2 Fondations envisagées.....	30
5.3 Justifications des fondations.....	30

Introduction

1 Objet de la note

Cette note a pour objet la justification au stade Projet d'Ouvrage d'Art, du Viaduc de Taulhac dans le cadre du Contournement du Puy en Velay (RN88). L'ouvrage permet le franchissement d'un vallon de 400 m de largeur, orienté Nord-Sud.

Cette note traite des appareils d'appui et des fondations profondes des piles P1 à P4 et de la culée C5. Les hypothèses retenues sont présentées et les résultats principaux issus des logiciels de calculs ou de tableurs sont insérés.

2 Règlements de calculs

Les appuis sont justifiés selon les Eurocodes définis ci-après :

- les normes NF EN 1990 et NF EN 1990/A1 et leurs annexes nationales,
- les normes NF EN 1991-1-1 et NF EN 1991-1-3 à NF EN 1991-1-7 ainsi que leurs annexes nationales,
- la norme NF EN 1991-2 et son annexe nationale,
- les normes NF EN 1992-1-1 et NF EN 1992-2 et leurs annexes nationales,
- la norme NF EN 1997-1 et son annexe nationale, ainsi que, en l'absence des normes nationales complémentaires visées par cette dernière, le fascicule 62 titre V (ainsi que la note d'information du SETRA de janvier 2008 pour l'utilisation de ce fascicule dans un calcul de pont aux Eurocodes),

Notations utilisées

Valeur de calcul de la portance d'un pieu à l'ELU $R_{c;d}$

$$R_{c;d} = R_{b;d} + R_{s;d}$$

$$R_{b;d} = R_{b;k} / \gamma_b$$

$$R_{s;d} = R_{s;k} / \gamma_s$$

Les valeurs caractéristiques de $R_{b;k}$ et $R_{s;k}$ sont déterminées par la *procédure alternative*

$$R_{b;k} = A_b \cdot q_{b;k} \text{ avec}$$

A_b : surface de la base du pieu

$q_{b;k}$: valeur caractéristique de la pression résistante à la base

$$R_{s;k} = \sum A_{s;i} \cdot q_{s;i;k} \text{ avec}$$

$A_{s;i}$: surface latérale du fut du pieu dans la couche i

$q_{s;i;k}$: valeur caractéristique de la contrainte de frottement latéral dans la couche i

3 Etude géotechnique

3.1 Coupe géologique

De haut en bas la coupe prévisible est la suivante :

- sur le versant Est, des basaltes recouverts en surface par une mince couche de limons,
- entre le versant Est et la RD38, un affleurement allongé Nord-Sud de sédiments fluvio-lacustres issus de

roches granitiques, recoupés localement de bancs d'argiles se développant en dessous des coulées basaltiques

- sur le versant Ouest et dans le fond de vallon, ce sont des colluvions hétérogènes résultant du démantèlement et de l'altération de laves et de basaltes. Ils sont constitués de sables et d'argiles.

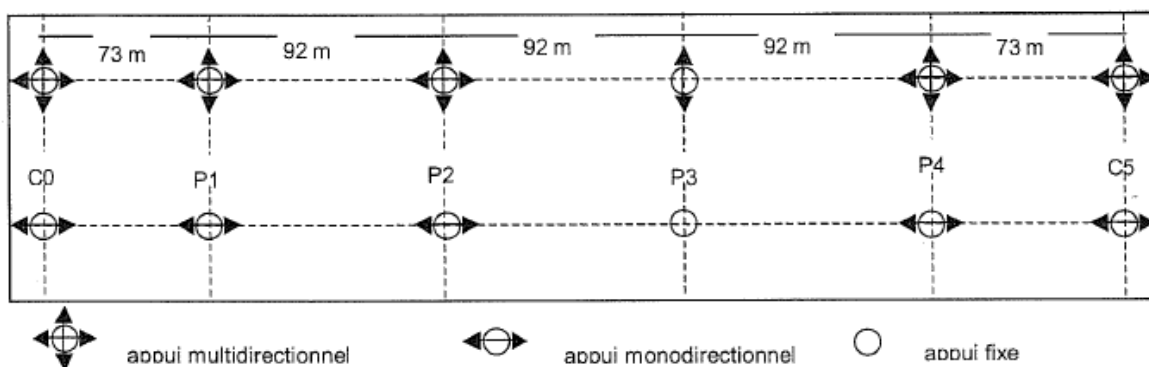
3.2 Sondages

Les sondages pressiométriques et carottés ont été effectués début 2005 par la société CEBTP à proximité des positions des appuis du présent projet. Le rapport, rédigé en avril 2005, présente des sondages arrêtés un peu au-delà de 30 m pour les culées et 40 m pour les piles. Chaque appui est concerné par au moins deux sondages pressiométriques et un sondage carotté (sauf pour C0) faisant l'objet d'un prédimensionnement. Notons toutefois, qu'à cette période, la solution consistait en deux tabliers séparés.

Appareils d'appui

1 Appareils d'appui

Les appareils dimensionnés sont à pot de caoutchouc. La disposition des appareils d'appui est indiquée sur le schéma suivant :



2 Efforts verticaux

Les réactions d'appui figurant dans les calculs sont issues des résultats du modèle établi avec le programme ST1.

Notation :

- **Sp** : surface de contact du PTFE
Pour des AA à pot glissant, on doit vérifier : à l'ELS qp $\sigma_p < 30$ MPa et à l'ELS caractéristique $\sigma_p < 45$ MPa ;
- **Sc** : surface de caoutchouc dans le pot
On doit vérifier à l'ELS caractéristique $\sigma_c < 30$ MPa

Surfaces minimales du caoutchouc et du PTFE (réactions données pour un appareil d'appui) :

	Culées	Piles 1 et 4	Piles 2 et 3
Rmax ELS caractéristique (kN)	6140	19497	19411
Surface caoutchouc Sc (m²) >	0,205	0,650	0,647
Surface PTFE Sp (m²) >	0,136	0,433	0,431

Choix des appareils d'appui

Sur culées, on choisit des appareils d'appui à pot de capacité **7000 kN**.

Appareil d'appui glissant libre :

- dimensions de l'appui : 655 x 655 mm
- hauteur de l'appui : 142 mm
- diamètre du pot : 590 mm

Appareil d'appui glissant guidé :

- dimensions de l'appui : 660 x 660 mm
- hauteur de l'appui : 162 mm
- diamètre du pot : 620 mm

Sur piles, on choisit des appareils d'appui à pot de capacité **20000 kN**.

Appareil d'appui glissant libre :

- dimensions de l'appui : 1100 x 1100 mm
- hauteur de l'appui : 250 mm
- diamètre du pot : 1040 mm

Appareil d'appui glissant guidé :

- dimensions de l'appui : 1110 x 1100 mm
- hauteur de l'appui : 265 mm
- diamètre du pot : 1050 mm

Appareil d'appui fixe :

- diamètre de l'appui : 1125 mm
- hauteur de l'appui : 197 mm
- diamètre du pot : 1095 mm

3 Efforts horizontaux

Appareils d'appui à pot glissants

On ne retient qu'une seule valeur de coefficient de calcul applicable à tous les appareils d'appui à pot considérés individuellement. Les calculs peuvent être menés à l'ELS et à l'ELU avec :

$\mu_{\max} = 3,5 \%$ (coefficient de frottement maximal d'un appareil pour une pression de contact valant 25 MPa)

PP = 0,3 % (précision de pose de l'appareil)

d'où $H = (\mu_{\max} + PP) \times V = 3,8 \% \times V$

Appareils d'appui à pot fixe

L'ouvrage comporte 10 appareils d'appui à pot glissants. Le coefficient de dégressivité vaut donc : $\alpha = 0,5$.

Les coefficients de frottement de calcul à retenir pour les appareils d'appui à pot glissant sont les suivants :

Coefficient de frottement défavorable : $\mu_a = 0,5 \cdot (\mu_{\max} + PP) \cdot (1 + \alpha) = 2,85 \%$

Coefficient de frottement favorable : $\mu_r = 0,5 \cdot (\mu_{\max} - PP) \cdot (1 - \alpha) = 0,80 \%$

Les réactions verticales et les efforts horizontaux en tête des appuis à l'ELS caractéristique figurent dans le tableau suivant (pour 2 appareils d'appui) :

Appui		C0	P1	P2	P3	P4	C5
ELS quasi-permanent	N (MN)	7,540	27,122	26,552	26,552	27,122	7,540
	H (MN)	0,287	1,031	1,009	1,460	1,031	0,287
ELS caractéristique	N (MN)	9,903	31,990	31,624	31,624	31,990	9,903
	H (MN)	0,376	1,216	1,202	1,739	1,216	0,376

4 Souffle des joints

L'appareil d'appui fixe est placé sur la pile P3. Le point fixe se déplace dans une plage de longueur proche de P3. Pour le calcul des souffles, nous prenons des variations linéaires de longueur du tablier (température, retrait) de $\varepsilon=10 \times 10^{-4}$.

Souffle sur C0

En prenant une longueur de 280m par rapport au point fixe (défavorable), on obtient un souffle de 280 mm.

Souffle sur C5

En prenant une longueur de 200m par rapport au point fixe (défavorable), on obtient un souffle de 200 mm.

Fondations des appuis

1 Pile P1

1.1 Etude de sol au droit de P1

Epaisseurs et différents horizons

Sondage	SP1-3		SP1-4	
<i>Faciès</i>	<i>e (m)</i>	<i>toit (NGF)</i>	<i>e (m)</i>	<i>toit (NGF)</i>
Remblai	0,40	778,65	3,00 *	779,30
Sable et limons argileux	9,60	778,25	9,40	776,30
Brèches	10,00	768,65	5,80	766,90
Cendres	1,20	758,65	0,80	761,10
Argile limoneuse	18,80	757,45	> 22,00	760,30

Type de fondation préconisé

- Type de fondation : Compte tenu de la nature du terrain rencontré, les pieux seront du type foré boue
- Ancrage : Dans les argiles limoneuses (minimum 3 diamètres)

Nous avons rencontré ces formations aux profondeurs et cotes suivantes :

Sondage	SP1-1	SP1-2	SP1-3	SP1-4	SC1
Profondeur (m)	13,70	18,00	20,00	18,20	19,26
Cote NGF	765,64	763,10	758,65	761,10	761,10

Eléments de calculs

Formation	Abaque	qs (kPa)	SP1-3		SP1-4	
			e (m)	Paramètre de point	e (m)	Paramètre de pointe
Remblai/limon peu compact	/	0	0,40	/	3,0	/
Sable et limons argileux	Q2	50	9,60	/	9,40	/
Brèche altérée	Q6	200	10,0		5,80	/
Argile limoneuse	Q1	40	3,90 à 4,50	$p^*_{1e} = 3,80 \text{ MPa}$ $K_p = 1,3$	3,00 à 4,50	$p^*_{1e} = 4,07 \text{ MPa}$ $K_p = 1,3$

Prédimensionnement

On retient le sondage SP1-4 le plus défavorable :

Sondage	Sondage SP1.4	
Diamètre (mm)	1300	1500
Fiche ancrage 3 diamètres (m)	3.9	4.5
Longueur de pieux	22.1	22.7
Q_u (kN)	14317	17879
Q_c (kN)	8617	10646

1.2 Fondations envisagées

La pile P1 est fondée sur deux files de 4 pieux circulaires de 1,50 m de diamètre ; ces pieux sont de type forés boue. Ces pieux ont une longueur de 20 m.

Section du pieu : $A = 1,767 \text{ m}^2$

Périmètre du pieu : $P = 4,71 \text{ m}$.

1.3 Justifications des fondations

Poids de la pile, de la semelle et des terres sur semelle: 17100 kN

Tablier : Nels-qp 27122 Hels-qp 1031 kN
 Nels-c 31990 Hels-c 1216 kN

Distance tête de pile/base de semelle : 29,9 m

Efforts à la base de la semelle :

Combinaison	N (kN)	M (kN.m)
ELS quasi-permanent	44222	30827
ELS caractéristique	49090	36358

Effort normal en tête des pieux :

ELS qp Nmax= 7240 kN
ELS caract. Nmax= 8156 kN
ELU Nmax= 11011 kN

Facteurs partiels de résistance :

Approche de calcul (art. 2.4.7.3.4) 2

Type de pieu : forés

$\gamma_b = 1,1$ (annexe A – NF EN 1997-1-1)

$\gamma_s = 1,1$

facteur de modèle : 1,0 (non défini à ce jour)

Données

Diamètre du pieu, B= 1,50 m Surface, Ab= 1,767 m²
Hauteur du pieu, h= 20,00 m
Refoulement de sol : non
Nbre de couches de sol : 3
Poids des terres, γ = 20 kN/m³

Résistance de pointe $R_{b;k}$

Nature du terrain à la base du pieu : **Argile limoneuse**
Facteur de portance k_p : **1,3** (tableau I – annexe C3 fasc. 62 titre V)
Pression limite équivalente P_{le}^* : **4,03** MPa (annexe E2 fasc. 62 titre V)

$$R_{b;k} = \mathbf{9,26} \quad \text{MN}$$

Résistance latérale $R_{s;k}$

Couche n°	Type de sol	hauteur de couche (m)	contrainte de frottement latéral $q_{s;i;k}$	surface latérale $A_{s;i}$ (m²)
1	Sable/limons argileux	8,80	0,05	41,47
2	Brèche altérée	5,80	0,20	27,33
3	Argile limoneuse	5,40	0,04	25,45

(OK)

$$R_{s;k} = \mathbf{8,56} \quad \text{MN}$$

Portance du pieu

$$R_{c;d} = \mathbf{16,20} \quad \text{MN}$$

2- Justifications

Sollicitations (effort normal N de compression en tête de pieu)

Combinaisons	N (MN)
ELS caractéristiques	8,156
ELS quasi-permanent	7,240
ELU durables ou transitoires	11,011
ELU accidentelles	0

ELU durables ou transitoires

$$F_{cd} = 11,01 < 13,5 = R_{c;d/1,2} \quad \text{OK}$$

ELU accidentelles

$$F_{cd} = 0 < 14,72 = R_{c;d/1,1} \quad \text{OK}$$

ELS (utilisation des notations du fasc. 62 titre V)

$$\begin{aligned} Q_{pu} &= 9,26 & (=R_b;k) \\ Q_{su} &= 8,56 & (=R_s;k) \\ Q_c &= 10,62 & \text{MN} \end{aligned} \quad (0,5Q_{pu} + 0,7Q_{su})$$

ELS caractéristiques

$$N_{els-c} = 8,16 < 9,65 = Q_c/1,1 \quad \text{OK}$$

ELS quasi-permanent

$$N_{els-qp} = 7,24 < 7,59 = Q_c/1,4 \quad \text{OK}$$

2 Pile P2

2.1 Etude de sol au droit de P2

Epaisseurs et différents horizons

Sondage	SC2		SP2-1		SP2-2		SP63 (AIS)	
<i>Faciès</i>	<i>e (m)</i>	<i>toit (NGF)</i>	<i>e (m)</i>	<i>toit (NGF)</i>	<i>e (m)</i>	<i>toit (NGF)</i>	<i>e (m)</i>	<i>toit (NGF)</i>
Remblai	0,48	780,15	3,00	780,35	2,60	780,50	/	/
Limons	10,07	779,67	8,50	777,35	8,40	777,90	10,00	778,52
Brèches	5,54	769,60	8,70	768,85	6,50	769,50	11,00	768,52
Sable	11,12	764,06	/	/	1,20	763,00		
Cendres	0,29	763,15	0,90	761,15	0,40	761,80		
Limons	8,80	762,65	2,90	760,25	9,90	761,40		
Argile limoneuse	13,70	753,85	17,00	757,35	11,00	751,50		

Type de fondation préconisé

- Type de fondation : Compte tenu de la nature du terrain rencontré, les pieux seront du type foré boue
- Ancrage : Dans les argiles limoneuses (minimum 3 diamètres), ou limons silteux

Nous avons rencontré ces formations aux profondeurs et cotes suivantes :

Sondage	SP2-1	SP2-2	SC 2
Profondeur (m)	23,00	19,10	17,50
Cote NGF	757,35	761,40	762,65

Eléments de calculs

Formation	Abaque	qs (kPa)	SP2-1		SP2-2	
			e (m)	Par. de pointe	e (m)	Par. de pointe
Remblai/limon peu compact	/	0,00	3,00		2,60	
Limons sableux	Q1	20	8,5		8,40	
Brèche destructurée	Q1	20	1,00		0,50	
Brèche altérée	Q6	180	7,70		6,00	
Limons cendreaux	Q1	50	3,80	/	1,60	/
Argile limoneuse	Q1	50	3,00 à 4,50	$p^*_{le} = 3,35 \text{ MPa}$ $K_p = 1,3$	3,00 à 4,50	$p^*_{le} = 3,27 \text{ MPa}$ $K_p = 1,3$

Prédimensionnement

On retient le sondage SP2-1 le plus défavorable :

Sondage	Sondage SP2.1	
Diamètre (mm)	1300	1500
Fiche ancrage 3 diamètres (m)	3.9	4.5
Longueur de pieux	27.9	28.5
Q_u (kN)	11573	14713
Q_c (kN)	6696	8429

2.2 Fondations envisagées

La pile P2 est fondée sur deux files de 4 pieux circulaires de 1,50 m de diamètre ; ces pieux sont de type forés boue. Ces pieux ont une longueur de 27 m. Ils sont ancrés plus profondément que ce que préconise le rapport de sol de manière à bénéficier d'une pression limite en pointe plus importante (4,5 Mpa env. au lieu de 3,35)

Section du pieu : $A = 1,767 \text{ m}^2$

Périmètre du pieu : $P = 4,71 \text{ m}$.

2.3 Justifications des fondations

Poids de la pile, de la semelle et des terres sur semelle: 17300 kN

Tablier : Nels-qp 26552 Hels-qp 1009 kN
 Nels-c 31624 Hels-c 1202 kN

Distance tête de pile/base de semelle : 31,05 m

Efforts à la base de la semelle :

Combinaison	N (kN)	M (kN.m)
ELS quasi-permanent	43852	31329
ELS caractéristique	48924	37322

Effort normal en tête des pieux :

ELS qp Nmax= 7222 kN
ELS caract. Nmax= 8189 kN
ELU Nmax= 11055 kN

Facteurs partiels de résistance :

Approche de calcul (art. 2.4.7.3.4) 2

Type de pieu : forés

$\gamma_b = 1,1$ (annexe A – NF EN 1997-1-1)

$\gamma_s = 1,1$

facteur de modèle : 1,0 (non défini à ce jour)

Données

Diamètre du pieu, B= 1,50 m Surface, Ab= 1,767 m²
Hauteur du pieu, h= 27,00 m
Refoulement de sol : non
Nbre de couches de sol : 5
Poids des terres, γ = 20 kN/m³

Résistance de pointe $R_{b;k}$

Nature du terrain à la base du pieu : Argile limoneuse
Facteur de portance k_p : 1,3 (tableau I – annexe C3 fasc. 62 titre V)
Pression limite équivalente P_{le}^* : 4,50 MPa (annexe E2 fasc. 62 titre V)

$$R_{b;k} = 10,34 \text{ MN}$$

Résistance latérale $R_{s;k}$

Couche n°	Type de sol	hauteur de couche (m)	contrainte de frottement latéral $q_{s;i;k}$	surface latérale $A_{s;i}$ (m²)
1	Limons	7,65	0,02	36,05
2	Brèche déstructurée	1,00	0,02	4,71
3	Brèche altérée	7,70	0,18	36,29
4	Limons	3,80	0,05	17,91
5	Argile limoneuse	6,85	0,05	32,28

(OK)

$$R_{s;k} = 9,86 \text{ MN}$$

Portance du pieu

$$R_{c;d} = 18,36 \text{ MN}$$

2- Justifications

Sollicitations (effort normal N de compression en tête de pieu)

Combinaisons	N (MN)
ELS caractéristiques	8,189
ELS quasi-permanent	7,222
ELU durables ou transitoires	11,055
ELU accidentelles	0

ELU durables ou transitoires

$$F_{cd} = 11,06 < 15,30 = R_{c;d/1,2} \quad \text{OK}$$

ELU accidentelles

$$F_{cd} = 0 < 16,69 = R_{c;d/1,1} \quad \text{OK}$$

ELS (utilisation des notations du fasc. 62 titre V)

$$\begin{aligned} Q_{pu} &= 10,34 & (=R_b;k) \\ Q_{su} &= 9,86 & (=R_s;k) \\ Q_c &= 12,07 & \text{MN} \quad (0,5Q_{pu}+0,7Q_{su}) \end{aligned}$$

ELS caractéristiques

$$N_{els-c} = 8,19 < 10,97 = Q_c/1,1 \quad \text{OK}$$

ELS quasi-permanent

$$N_{els-qp} = 7,22 < 8,62 = Q_c/1,4 \quad \text{OK}$$

3 Pile P3

3.1 Etude de sol au droit de P3

Epaisseurs et différents horizons

Sondage	SC3		SP3-1		SP3-2	
Faciès	e (m)	toit (NGF)	e (m)	toit (NGF)	e (m)	toit (NGF)
Limons	1,60	787,80	1,40	788,35	1,50	786,75
Sable	8,11	786,20	6,60	786,95	8,30	785,25
Brèche	10,59	778,09	13,70	780,35	9,40	776,95
Sable basaltique	1,22	767,50	1,10	766,65	0,80	767,55
Sable silteux	9,48	766,28	11,20	765,55	8,20	766,75
Silt	8,90	756,70	6,00	754,35	11,80	758,55

Type de fondation préconisé

- Type de fondation : Compte tenu de la nature du terrain rencontré, les pieux seront du type foré boue
- Ancrage : Dans les sables silteux (minimum 3 diamètres)

Nous avons rencontré ces formations aux profondeurs et cotes suivantes :

Sondage	SP3-1	SP3-2	SC 3
Profondeur (m)	21,70	19,20	20,30
Cote NGF	766,65	767,55	767,50

Eléments de calculs

Formation	Abaque	qs (kPa)	SP3-1		SP3-2	
			e (m)	Paramètre de pointe	e (m)	Paramètre de pointe
Limon peu compact	/	0,00	2,00		1,50	
Sable beige	Q1	40	6,00		8,30	
Brèche déstructurée	Q1	20	/		2,70	
Brèche altérée	Q6	240	13,70		6,70	
Sable	Q1	40	3,00 à 4,50	$p_{te}^* = 5,10 \text{ MPa}$ $K_p = 1,2$	3,00 à 4,50	$p_{te}^* = 5,27 \text{ MPa}$ $K_p = 1,2$

Prédimensionnement

On retient le sondage SP3-2 le plus défavorable :

Sondage	Sondage SP3.2	
Diamètre (mm)	1300	1500
Fiche ancrage 3 diamètres (m)	3.9	4.5
Longueur de pieux	23.1	23.7
Q_u (kN)	17175	22351
Q_c (kN)	10344	13225

3.2 Fondations envisagées

La pile P3 est fondée sur deux files de 4 pieux circulaires de 1,50 m de diamètre ; ces pieux sont de type forés boue. Ces pieux ont une longueur de 21 m.

Section du pieu : $A = 1,767 \text{ m}^2$

Périmètre du pieu : $P = 4,71 \text{ m}$.

3.3 Justifications des fondations

Poids de la pile, de la semelle et des terres sur semelle: 16200 kN

Tablier : Nels-qp 26552 Hels-qp 1460 kN
 Nels-c 31624 Hels-c 1739 kN

Distance tête de pile/base de semelle : 25,9 m

Efforts à la base de la semelle :

Combinaison	N (kN)	M (kN.m)
ELS quasi-permanent	42752	37814
ELS caractéristique	47824	45040

Effort normal en tête des pieux :

ELS qp Nmax= 7445 kN
ELS caract. Nmax= 8480 kN
ELU Nmax= 11448 kN

Facteurs partiels de résistance :

Approche de calcul (art. 2.4.7.3.4) 2

Type de pieu : forés

$\gamma_b = 1,1$ (annexe A – NF EN 1997-1-1)

$\gamma_s = 1,1$

facteur de modèle : 1,0 (non défini à ce jour)

Données

Diamètre du pieu, B= 1,50 m Surface, Ab= 1,767 m²
Hauteur du pieu, h= 21,00 m
Refoulement de sol : non
Nbre de couches de sol : 4
Poids des terres, γ = 20 kN/m³

Résistance de pointe $R_{b;k}$

Nature du terrain à la base du pieu : **Sable**
Facteur de portance k_p : **1,2** (tableau I – annexe C3 fasc. 62 titre V)
Pression limite équivalente P_{le}^* : **5,27** MPa (annexe E2 fasc. 62 titre V)

$$R_{b;k} = 11,18 \text{ MN}$$

Résistance latérale $R_{s;k}$

Couche n°	Type de sol	hauteur de couche (m)	contrainte de frottement latéral $q_{s;i;k}$	surface latérale $A_{s;i}$ (m²)
1	Sable beige	6,65	0,04	31,34
2	Brèche déstructurée	2,70	0,02	12,72
3	Brèche altérée	6,70	0,24	31,57
4	Sable	4,95	0,04	23,33

(OK)

$$R_{s;k} = 10,02 \text{ MN}$$

Portance du pieu

$$R_{c;d} = 19,27 \text{ MN}$$

2- Justifications

Sollicitations (effort normal N de compression en tête de pieu)

Combinaisons	N (MN)
ELS caractéristiques	8,480
ELS quasi-permanent	7,445
ELU durables ou transitoires	11,448
ELU accidentelles	0

ELU durables ou transitoires

Fcd= **11,45** < **16,06** =Rc;d/1,2 **OK**

ELU accidentelles

Fcd= **0** < **17,52** =Rc;d/1,1 **OK**

ELS (utilisation des notations du fasc. 62 titre V)

Qpu= 11,18 (=Rb;k)
Qsu= 10,02 (=Rs;k)
Qc= 12,60 MN (0,5Qpu+0,7Qsu)

ELS caractéristiques

Nels-c= **8,48** < **11,46** '=Qc/1,1 **OK**

ELS quasi-permanent

Nels-qp= **7,44** < **9,00** '=Qc/1,4 **OK**

4 Pile P4

4.1 Etude de sol au droit de P4

Epaisseurs et différents horizons

SONDAGE	SC4		SP 4-1		SP 4-2	
Faciès	e (m)	toit (NGF)	e (m)	toit (NGF)	e (m)	toit (NGF)
Limons	1,20	799,95	2,40	798,80	4,00	707,75
Argile à blocs	1,32	798,75				
Brèches déstructurées	17,98	797,43	38,16	796,40	36,30	793,75
Brèche altérée	21,00	779,45				

Type de fondation préconisé

- Type de fondation : Compte tenu de la nature du terrain rencontré, les pieux seront du type foré boue
- Ancrage : Dans les brèches altérées (minimum 3 diamètres)

NOTA : Des pieux forés simples peuvent être envisagés, il faut cependant noter que cette technique dans ce type de formation peut générer des risques d'éboulement des parois du forage.

Nous avons rencontré ces formations aux profondeurs et cotes suivantes :

Sondage	SC4	SP4-1	SP4-2	SP4-3	SP4-4
Profondeur (m)	2,40	2,40	4,00	2,90	3,30
Cote NGF	797,55	796,40	793,75	797,20	795,75

Eléments de calculs

Formation	Abaque	qs (kPa)	SP4-1		SP4-2	
			e (m)	Paramètre de pointe	e (m)	Paramètre de pointe
Limon et argile	/	0,00	2,40		4,00	
Brèche altérée déstructurée	Q3	240	3,90 à 4,50	$p^*_{1e} = 4,80 \text{ MPa}$ $K_p = 1,3$	3,00 à 4,50	$p^*_{1e} = 4,32 \text{ MPa}$ $K_p = 1,3$

Prédimensionnement

On retient le sondage SP4-2 le plus défavorable :

Sondage	Sondage SP 4.2	
Diamètre (mm)	1300	1500
Fiche ancrage 3 diamètres (m)	3.9	4.5
Longueur de pieux	7.9	8.5
Q_u (kN)	11260	14991
Q_c (kN)	6394	8513

4.2 Fondations envisagées

La pile P4 est fondée sur deux files de 4 pieux circulaires de 1,50 m de diamètre ; ces pieux sont de type forés boue. Ces pieux ont une longueur de 8 m.

Section du pieu : $A = 1,767 \text{ m}^2$

Périmètre du pieu : $P = 4,71 \text{ m}$.

4.3 Justifications des fondations

Poids de la pile, de la semelle et des terres sur semelle: 14200 kN

Tablier : Nels-qp 27122 Hels-qp 1031 kN
 Nels-c 31990 Hels-c 1216 kN

Distance tête de pile/base de semelle : 16,9 m

Efforts à la base de la semelle :

Combinaison	N (kN)	M (kN.m)
ELS quasi-permanent	41322	17424
ELS caractéristique	46190	20550

Effort normal en tête des pieux :

ELS qp Nmax= 6133 kN
ELS caract. Nmax= 6915 kN
ELU Nmax= 9336 kN

Facteurs partiels de résistance :

Approche de calcul (art. 2.4.7.3.4) 2

Type de pieu : forés

$\gamma_b = 1,1$ (annexe A – NF EN 1997-1-1)

$\gamma_s = 1,1$

facteur de modèle : 1,0 (non défini à ce jour)

Données

Diamètre du pieu, B= 1,50 m Surface, Ab= 1,767 m²
Hauteur du pieu, h= 8,00 m
Refoulement de sol : non
Nbre de couches de sol : 2
Poids des terres, γ = 20 kN/m³

Résistance de pointe $R_{b;k}$

Nature du terrain à la base du pieu : Brèche altérée destructurée
Facteur de portance k_p : 1,3 (tableau I – annexe C3 fasc. 62 titre V)
Pression limite équivalente P_{le}^* : 4,50 MPa (annexe E2 fasc. 62 titre V)

$$R_{b;k} = 10,34 \text{ MN}$$

Résistance latérale $R_{s;k}$

Couche n°	Type de sol	hauteur de couche (m)	contrainte de frottement latéral $q_{s;i;k}$	surface latérale $A_{s;i}$ (m²)
1	Limon et argile	1,35	0,00	6,36
2	Sable beige	6,65	0,24	31,34

(OK)

$$R_{s;k} = 7,52 \text{ MN}$$

Portance du pieu

$$R_{c;d} = 16,24 \text{ MN}$$

2- Justifications

Sollicitations (effort normal N de compression en tête de pieu)

Combinaisons	N (MN)
ELS caractéristiques	6,915
ELS quasi-permanent	6,133
ELU durables ou transitoires	9,336
ELU accidentelles	0

ELU durables ou transitoires

Fcd= **9,34** < **13,53** =Rc;d/1,2 **OK**

ELU accidentelles

Fcd= **0** < **14,76** =Rc;d/1,1 **OK**

ELS (utilisation des notations du fasc. 62 titre V)

Qpu= 10,34 (=Rb;k)
Qsu= 7,52 (=Rs;k)
Qc= 10,43 MN (0,5Qpu+0,7Qsu)

ELS caractéristiques

Nels-c= **6,92** < **9,49** '=Qc/1,1 **OK**

ELS quasi-permanent

Nels-qp= **6,13** < **7,45** '=Qc/1,4 **OK**

5 Culée C5

5.1 Etude de sol au droit de C5

Epaisseurs et différents horizons

Sondage	SC5		SP5-1		SP5-2	
Faciès	e (m)	toit (NGF)	e (m)	toit (NGF)	e (m)	toit (NGF)
Limons/terre végétale	0,14	805,85	3,00	807,15	2,00	802,65
Colluvions	1,36	805,61				
Pouzzolane sablo-graveleuse	21,50	804,35	29,95	804,15	3,50	800,65
Scories indurées pouzzolane	7,40	782,85			27,29	797,95

Type de fondation préconisé

- Type de fondation : Compte tenu de la nature du terrain rencontré, les pieux seront du type foré boue
- Ancrage : Dans la pouzzolane (minimum 3 diamètres)

Nous avons rencontré ces formations aux profondeurs et cotes suivantes :

Sondage	SP5-1	SP5-2	SC 5
Profondeur (m)	3,0	5,50	2,50
Cote NGF	804,15	797,15	803,35

Eléments de calculs

Formation	Abaque	qs (kPa)	SP5-1		SP5-2	
			e (m)	Paramètre de pointe	e (m)	Paramètre de pointe
Colluvions et limons	/	0,00	3,00		2,00	
Pouzzolane sableuse	Q2	80	/		3,50	
Pouzzolane	Q6	200	3,90 à 4,50	$p^*_{1e} = 4,90 \text{ MPa}$ $K_p = 1,3$	3,90 à 4,50	$p^*_{1e} = 5,45 \text{ MPa}$ $K_p = 1,3$

Aucun frottement latéral n'a été pris en compte dans le remblai technique de la culée C5.

Prédimensionnement

On retient le sondage SP5-1 le plus défavorable :

Sondage	Sondage SP 5.1	
Diamètre (mm)	1300	1500
Fiche ancrage 3 diamètres (m)	3.9	4.5
Longueur de pieux	6.9	7.5
Q_u (kN)	11641	15498
Q_c (kN)	6457	8597

Sondage	Tassements estimés			
	Plate-forme 813 NGF		Plate-forme 817 NGF	
	Hauteur remblai (m)	Tassement (cm)	Hauteur remblai (m)	Tassement (cm)
SP5-1	6,00	1,2	10,5	2,1
SP5-2	10,5	0,7	15,00	1,0

5.2 Fondations envisagées

La culée C5 est fondée sur deux files de 4 pieux circulaires de 1,10 m de diamètre ; ces pieux sont de type forés boue. Ces pieux ont une longueur de 17 m.

Section du pieu : $A = 0,95 \text{ m}^2$

Périmètre du pieu : $P = 3,46 \text{ m}$.

5.3 Justifications des fondations

Efforts à la base du chevêtre

Partie d'ouvrage	Dimensions			V (kN)	H (kN)	e/o (m)	Mo (kN.m)	
	l	L	h					
Culée								
Chevêtre	5,5	22,04	1,7	5461		0,00	0	(2 murs de 21 m²)
Mur garde-grève	0,6	22,04	4,6	1612		-1,35	-2176	
Corbeau JdC	0,6	22,04	0,6	210		-0,75	-158	
Corbeau DDT	0,3	18,00	0,45	64		-1,8	-116	
Murs en retour	21	2	0,7	779		-3,95	-3077	
Murs cache-appuis	0,53	9	4,6	581		0,65	378	
Terres sur semelle	0,95	22,04	4,6	1926		-2,18	-4199	
Poussée des terres		20,6	6,3		2698	2,10	5666	
Total culée				10634	2698		-3683	
Tablier								
Réaction verticale tablier ELS qp				7540		0,85	6409	
Réaction horizontale ELS qp					287	1,7	488	
Réaction verticale tablier ELS caract				9903		0,85	8418	
Réaction horizontale ELS caract					376	1,7	639	
Réaction verticale tablier ELU				13369		0,85	11364	
Réaction horizontale ELU					508	1,7	863	
BILAN								
ELS quasi-permanent				18174	2985		3214	
ELS caractéristiques				20537	3074		5374	
ELU				27726	4150		8544	

(2 murs de 21 m²)

Effort normal en tête des pieux :

ELS qp	Nmax=	2515	kN
ELS caract.	Nmax=	2974	kN
ELU	Nmax=	4113	kN

Facteurs partiels de résistance :

Approche de calcul (art. 2.4.7.3.4) 2

Type de pieu : forés

$\gamma_b = 1,1$ (annexe A – NF EN 1997-1-1)

$\gamma_s = 1,1$

facteur de modèle : 1,0 (non défini à ce jour)

Données

Diamètre du pieu, B=	1,10	m	Surface, Ab=	0,950	m²
Hauteur du pieu, h=	17,00	m			
Refoulement de sol :	non				
Nbre de couches de sol :	4				
Poids des terres, γ =	20	kN/m³			

Résistance de pointe $R_{b;k}$

Nature du terrain à la base du pieu : Pouzzolane
Facteur de portance k_p : 1,3 (tableau I – annexe C3 fasc. 62 titre V)
Pression limite équivalente P_{le}^* : 4,90 MPa (annexe E2 fasc. 62 titre V)

$$R_{b;k} = 6,05 \text{ MN}$$

Résistance latérale $R_{s;k}$

Couche n°	Type de sol	hauteur de couche (m)	contrainte de frottement latéral $q_{s;i;k}$	surface latérale $A_{s;i}$ (m²)
1	Remblais	8,50	0,00	29,37
2	Colluvions et limons	2,00	0,00	6,91
3	Pouzzolane sableuse	3,50	0,08	12,10
4	Pouzzolane	3,00	0,20	10,37

(OK)

$$R_{s;k} = 3,04 \text{ MN}$$

Portance du pieu

$$R_{c;d} = 8,27 \text{ MN}$$

2- Justifications

Sollicitations (effort normal N de compression en tête de pieu)

Combinaisons	N (MN)
ELS caractéristiques	2,974
ELS quasi-permanent	2,515
ELU durables ou transitoires	4,113
ELU accidentelles	0

ELU durables ou transitoires

Fcd= 4,11 < 6,89 =Rc;d/1,2 OK

ELU accidentelles

Fcd= 0 < 7,52 =Rc;d/1,1 OK

ELS (utilisation des notations du fasc. 62 titre V)

Qpu= 6,05 (=Rb;k)
Qsu= 3,04 (=Rs;k)
Qc= 5,16 MN (0,5Qpu+0,7Qsu)

ELS caractéristiques

Nels-c= 2,97 < 4,69 '=Qc/1,1 OK

ELS quasi-permanent

Nels-qp= 2,52 < 3,68 '=Qc/1,4 OK