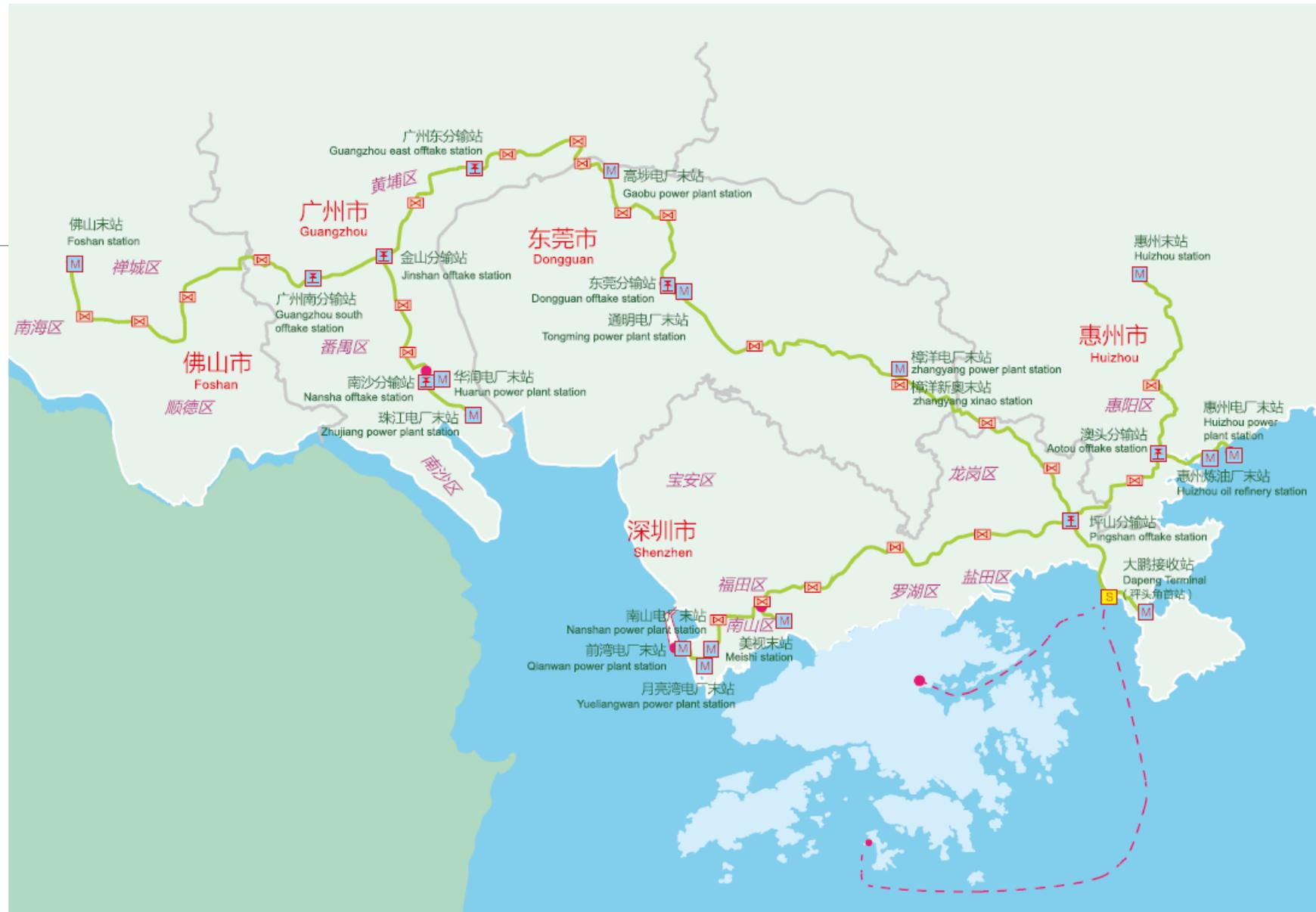


Un exemple de problèmes posés par le dimensionnement de fondations de machines vibrantes

BRUNO DEMAY



Projet du terminal d'importation de Gaz Naturel Liquéfié GUANGDONG LNG (2003-2007)



Vue d'ensemble du terminal



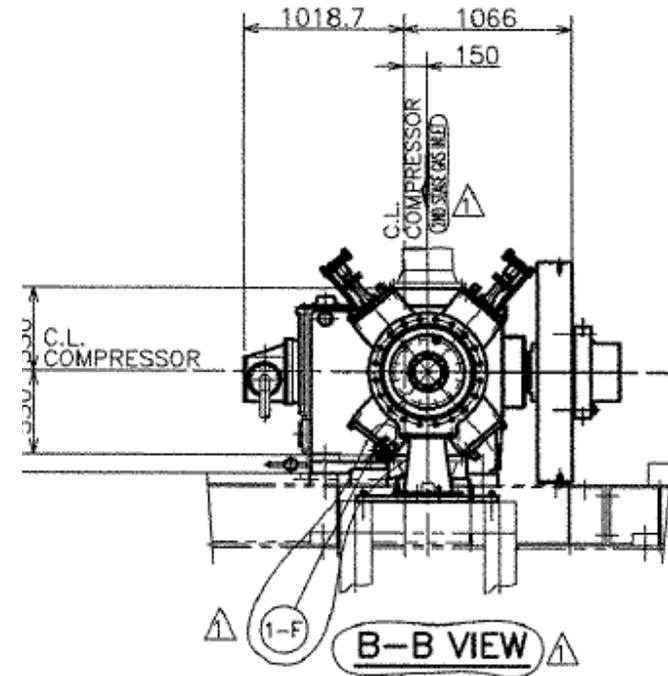
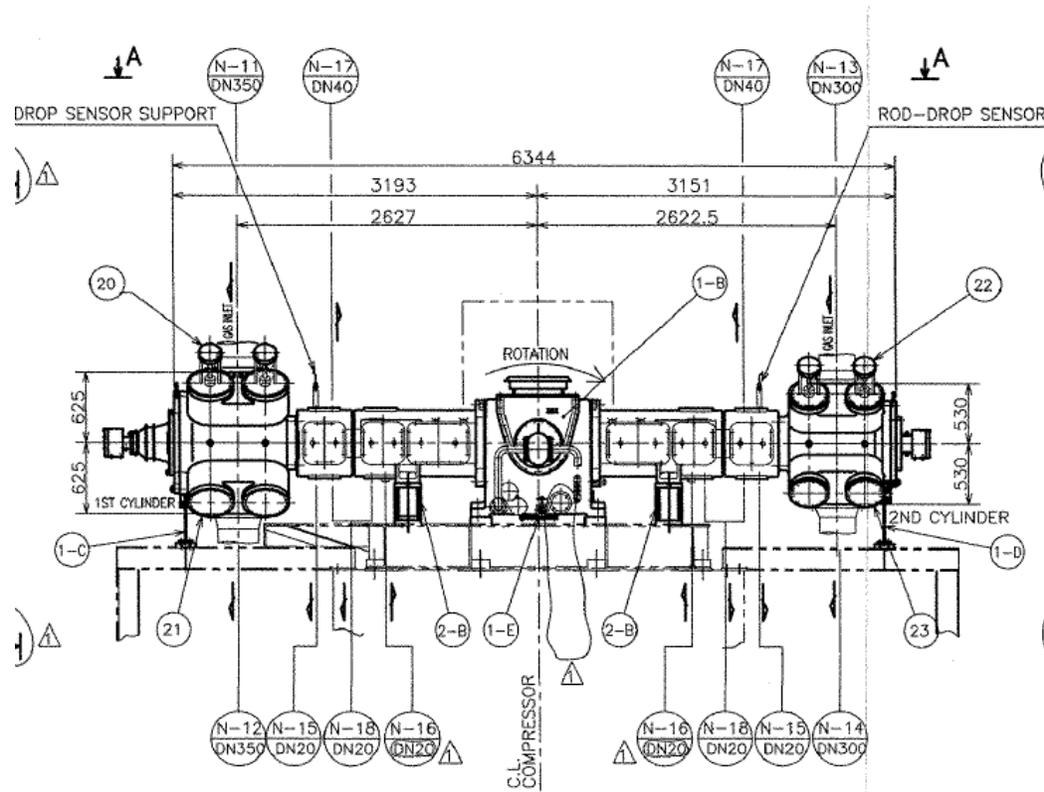
Compresseurs Boil-Off Gaz (BOG compressors)



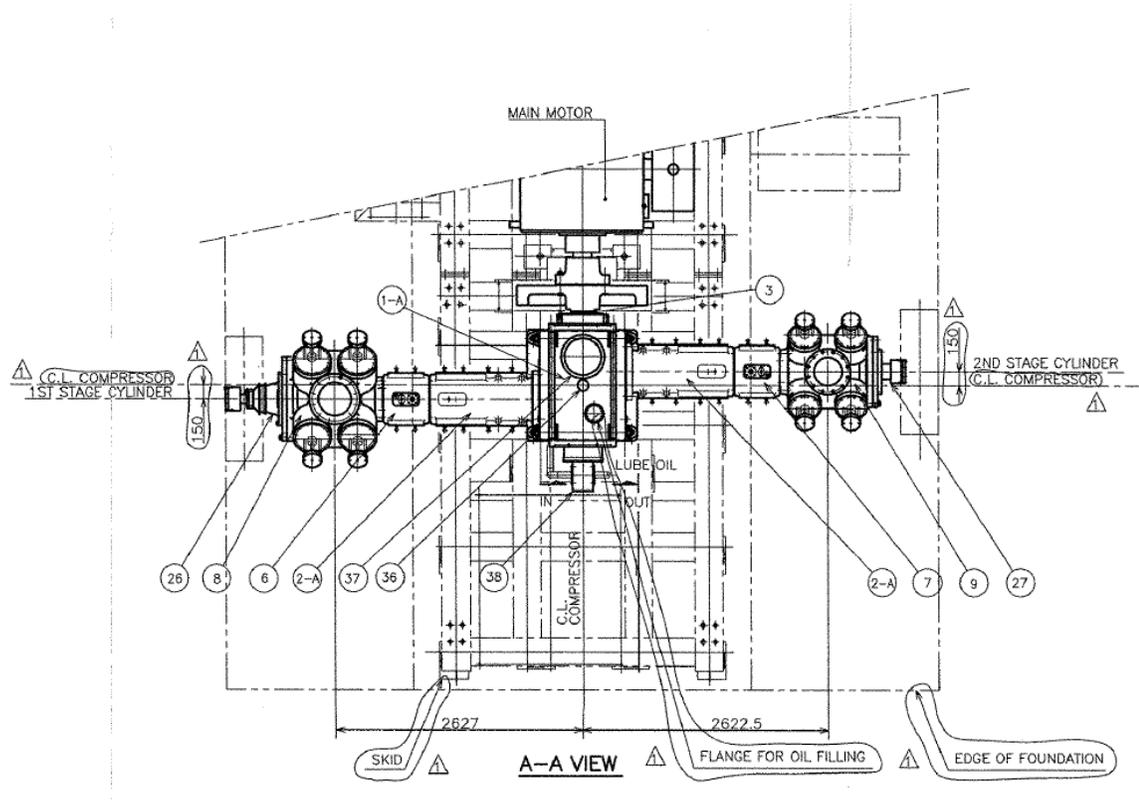
BOG COMPRESSOR

BOG (*boil off gas*) : tout apport de chaleur dans un équipement ou une installation qui contient du GNL conduit à sa vaporisation partielle appelée *boil off gas* ou « gaz d'évaporation ». S'il n'est pas évacué, le BOG s'accumule, entraînant ainsi une montée en pression. Sur les terminaux méthaniers, en exploitation normale, des compresseurs permettent de maintenir la pression stable dans les réservoirs de stockage ; ils évacuent le BOG vers des unités de réincorporation qui le mélangent au GNL émis. Le taux journalier d'évaporation avec un réservoir classique est de 0,05 à 1 %.

Détail du compresseur IHI (2u)



Détail du compresseur IHI



- Compresseur alternatif à deux cylindres horizontaux
- Non – lubrifié
- Très sensible aux micro-déplacements horizontaux

Mode de fonctionnement / charges statiques et dynamiques à prendre en compte

1. Maximum Overall Static Load (Normal Load) F_z

(1) Magnitude

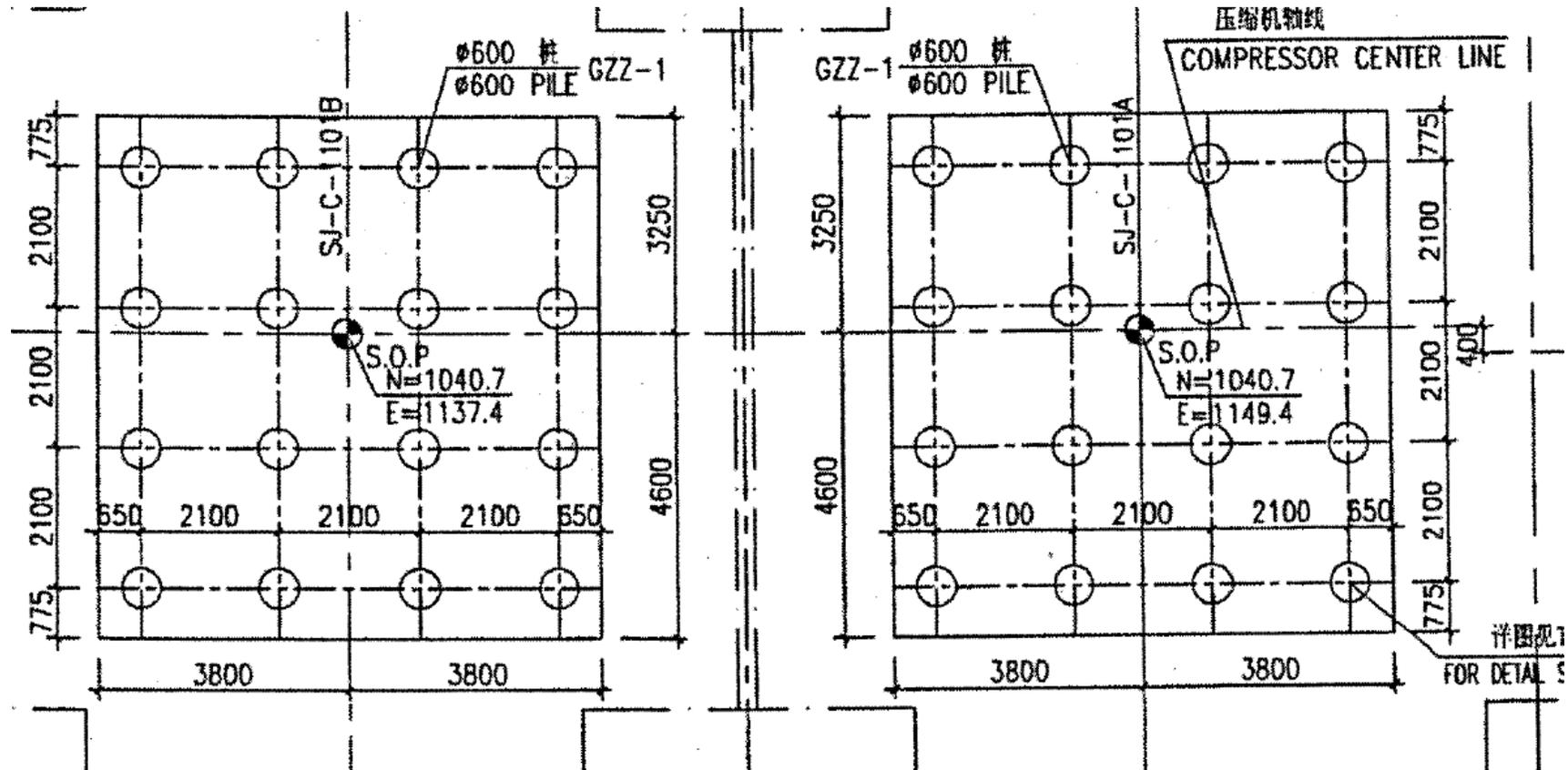
$$F_z = W_c + W_f$$

$$W_c = \text{Overall weight of Compressor} \\ = 363.8 \quad [\text{kN}]$$

$$W_f = \text{Weight of Foundation Block} \\ (\text{will be decided by civil engineer}) \\ = \quad \quad \quad [\text{kN}]$$

- Classiquement : masse de la fondation = 3 à 5 fois la masse de l'équipement pour éviter les problèmes de résonance
- Donc ici $370 \times (3 \text{ à } 5) = 1110 \text{ à } 1850 \text{ KN}$
- Massif de 45 à 75 m³

Conception initiale des fondations : massif 7,6 x 7,85 m sur 24 pieux ϕ 600



Mode de fonctionnement / charges statiques et dynamiques à prendre en compte

LOAD TABLE

NAME	MARK	KIND OF LOAD	DIRECTION LOAD	LOAD	REMARKS
CENTER OF GRAVITY FOR COMPRESSOR ASSEMBLY	G	STATIC LOAD	VERTICAL	37100kg	INCLUDING COMPRESSOR, SKID, LO UNIT, MOTOR, PIPING, AND LOCAL PANEL
UNBALANCED INERTIA FORCE	FU	DYNAMIC LOAD	HORIZONTAL	991 ~ -1476 N	7.000Hz
COUPLED OF FORCE	MH	DYNAMIC LOAD	HORIZONTAL	42702~ -32183N·m	7.000Hz
COUPLED OF FORCE	MV	DYNAMIC LOAD	VERTICAL	10725~ -10725N·m	7.000Hz
REACTION OF MOTOR TORQUE	P1	DYNAMIC LOAD	VERTICAL	-12505N·m	7.000Hz
REACTION OF MOTOR TORQUE	P2	DYNAMIC LOAD	VERTICAL	12505N·m	7.000Hz

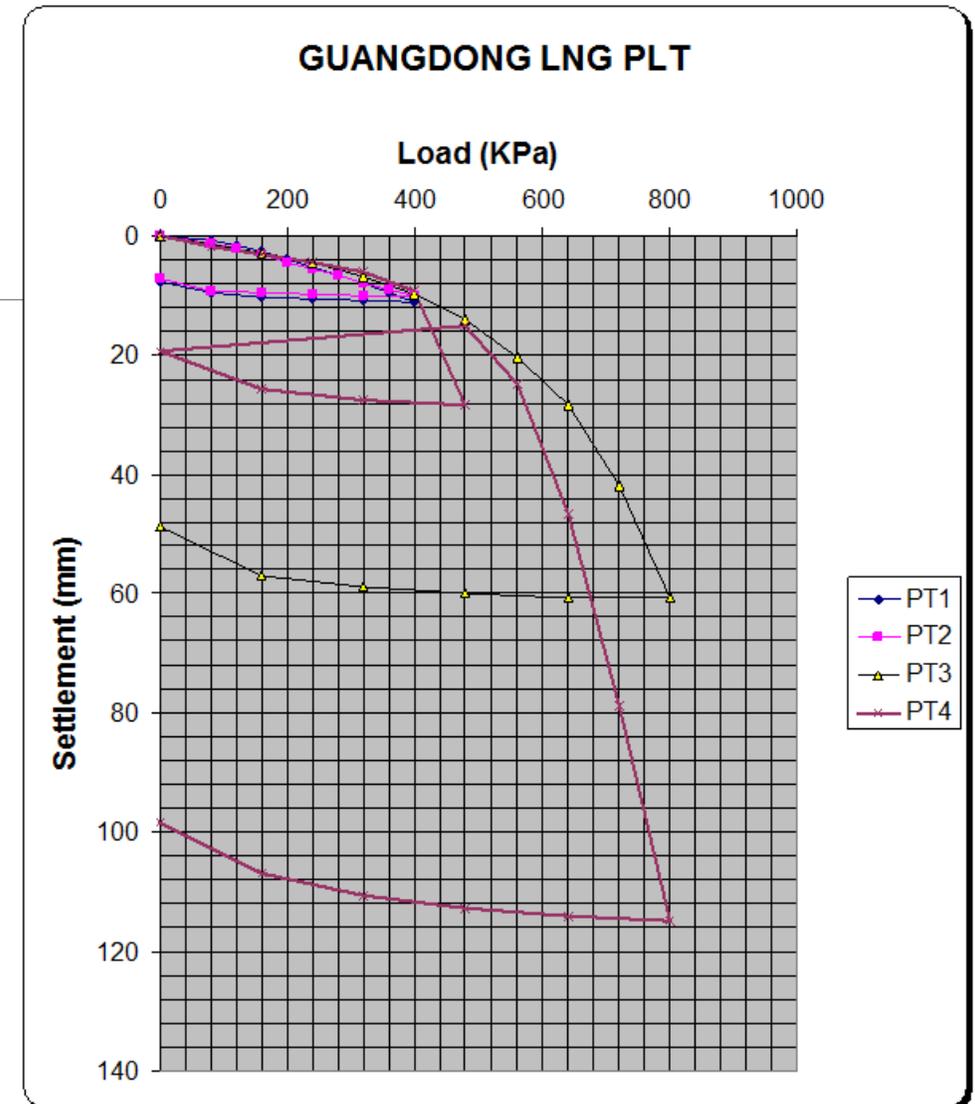
ALLOWABLE VIBRATION OF FOUNDATION	
	ALLOWABLE LIMITED (PEAK TO PEAK AMPLITUDE)
δH	30 μm
δA	15 μm
δV	15 μm

Remblais hétérogènes gagnés sur la mer



- Problème : estimation des « performances » géotechniques de ces remblais
- Capacité portante
- Modules de déformation
- Evaluation des tassements à moyen / long terme
- Réalisation des fondations profondes

Essais de plaque...

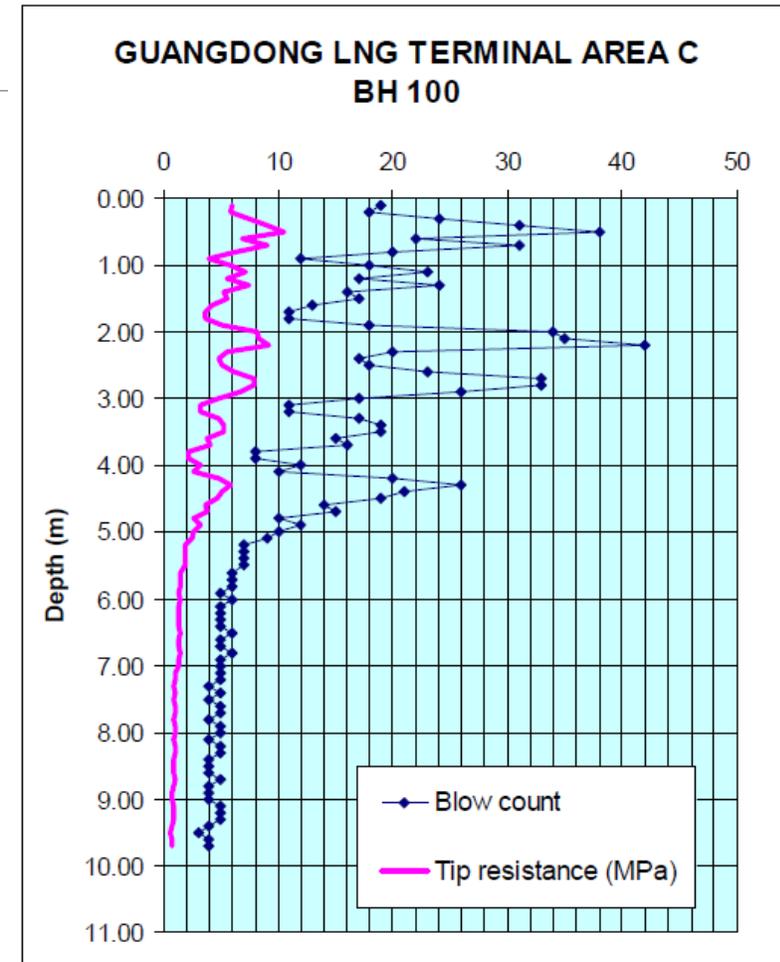
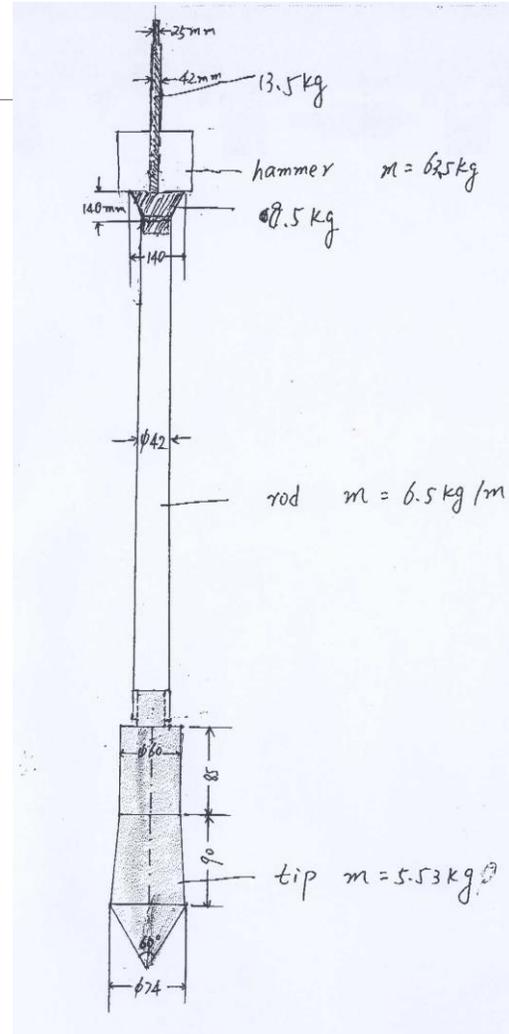


A partir des essais de plaque, obtention de caractéristiques moyennes pour les fondations superficielles

Load interval	Deformation modulus (MPa)	Subgrade reaction modulus under a 2mx2m foundation (MPa / m)
0-200 KPa	80	50
0-400 KPa	64	40
200-400 KPa	50	30

- Capacité portante moyenne (SBC) en fait très variable suivant la localisation sur le site
- Variable de 1 à 2 bars
- Influence de la taille de la fondation

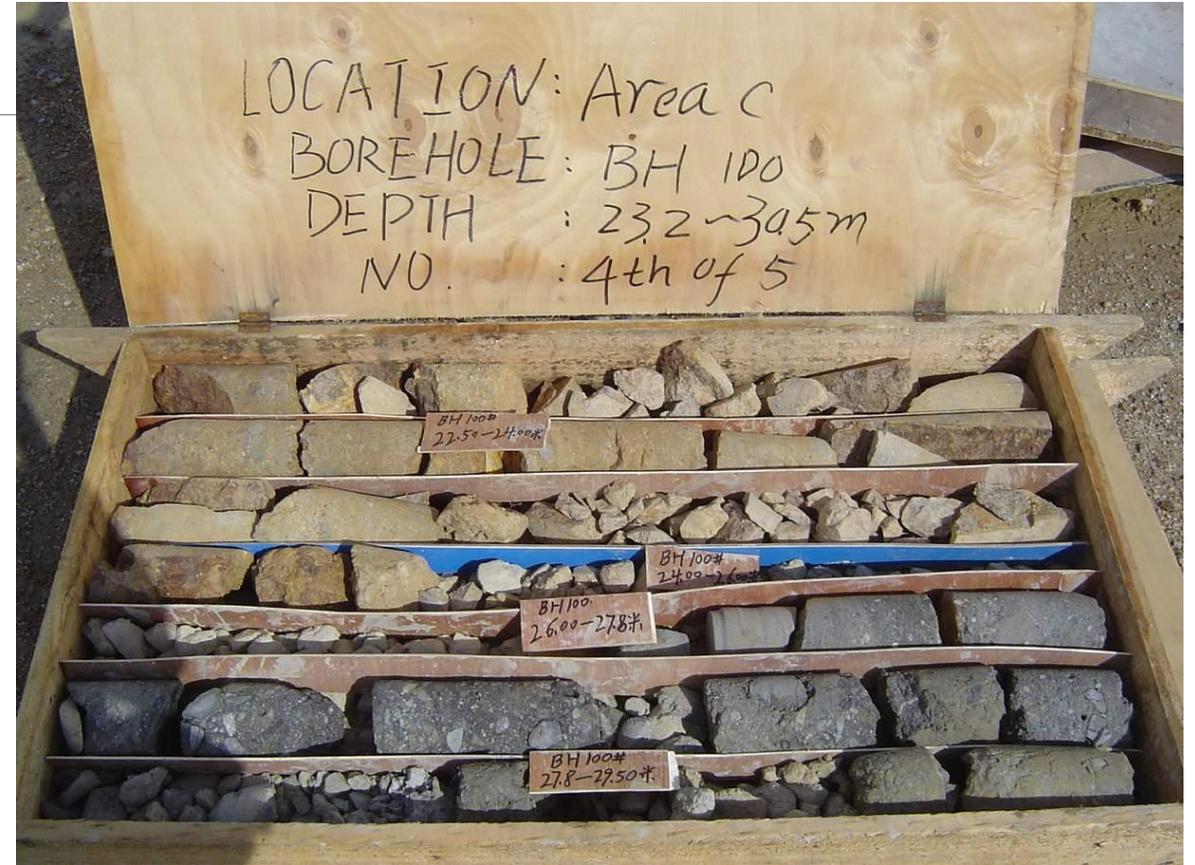
Reconnaissances des fondations superficielles au pénétromètre dynamique



Premier sondage disponible dans la zone des BOG compressors



Premier sondage (suite)



Deuxième sondage...



Deuxième sondage (suite)



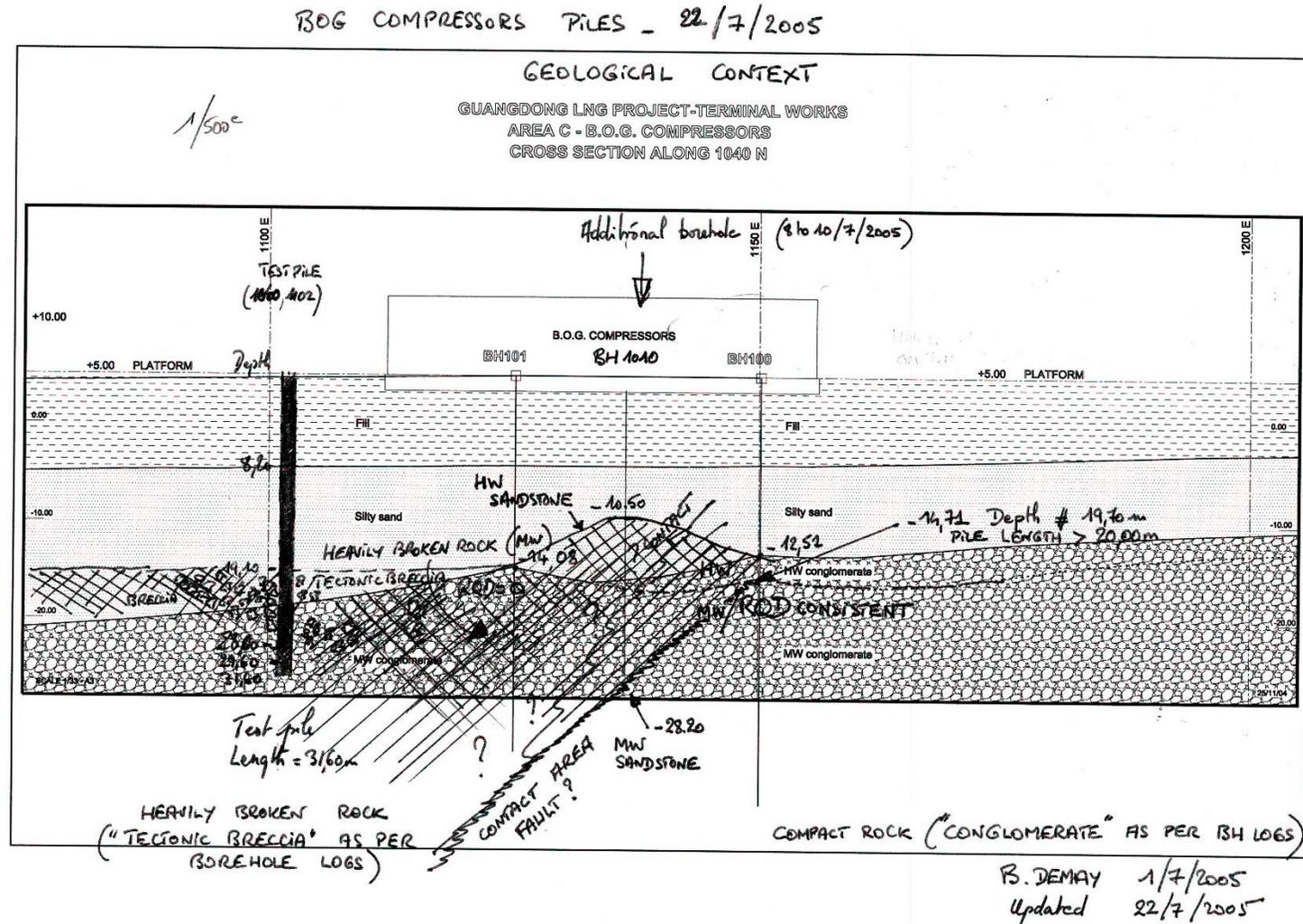
Log du deuxième sondage

Borehole BH101 Log

Project: Terminal and Trunkline Survey,GD LNG Coordinate: N= 1041.11 Date: 2004. 8.05- 8.07
 Client: GuangDong Contractor Elevation: H= 5.02m Groundwater Level: 4.50m
 Total Depth: 38.50m

No of Strata	Geological Symbol	Thickness of Stratum (m)	Depth of Stratum (m)	Elevation of Stratum Bottom (m)	Legend	Description of Lithology	SPT	Sample	RQD	TCR
							(N)	No.		
							Depth(m)	Depth(m)		
1	Q ^{ml}	9.20	9.20	-4.18		Artificial fill: Brown yellow and gray. Mainly consisting of silt clay and broken stone whose diameter is about 3~10cm. It is middle dense after compacted.		101- 1 1.00- 1.25 101- 2 5.00- 5.30		
3	Q ^{mo}	9.80	19.10	-14.08		Silty sand: dark gray, with little organic material /shell fragment and cobble whose diameter is 2~8cm. Saturated, slightly dense .	15.0 10.25-10.55 13.0 12.85-12.95 15.0 14.65-14.95 13.0 16.75-17.05 14.0 18.65-18.95			
6	Fault	8.80	28.00	-22.98		MW tectonic breccia: brown yellow or gray yellow The diameter of breccia is 2~5cm. Highly fractured. Fractured surfaces stained brown. Can't broken when twisted. Core shaped block and pillar. Drilling by alloy is difficult.			57	
		0.70	28.70	-23.68			HW tectonic breccia: brown yellow or gray yellow The diameter of breccia is 2~5cm. Highly fractured. Core shaped calastic with soil. Drilling by alloy is easy.			45 60 75
7	K	9.80	38.50	-33.48		MW conglomerate: gray yellow or gray. Badly cemented. Only cobbles are left by drilling. drilling by alloy is difficult.			0	

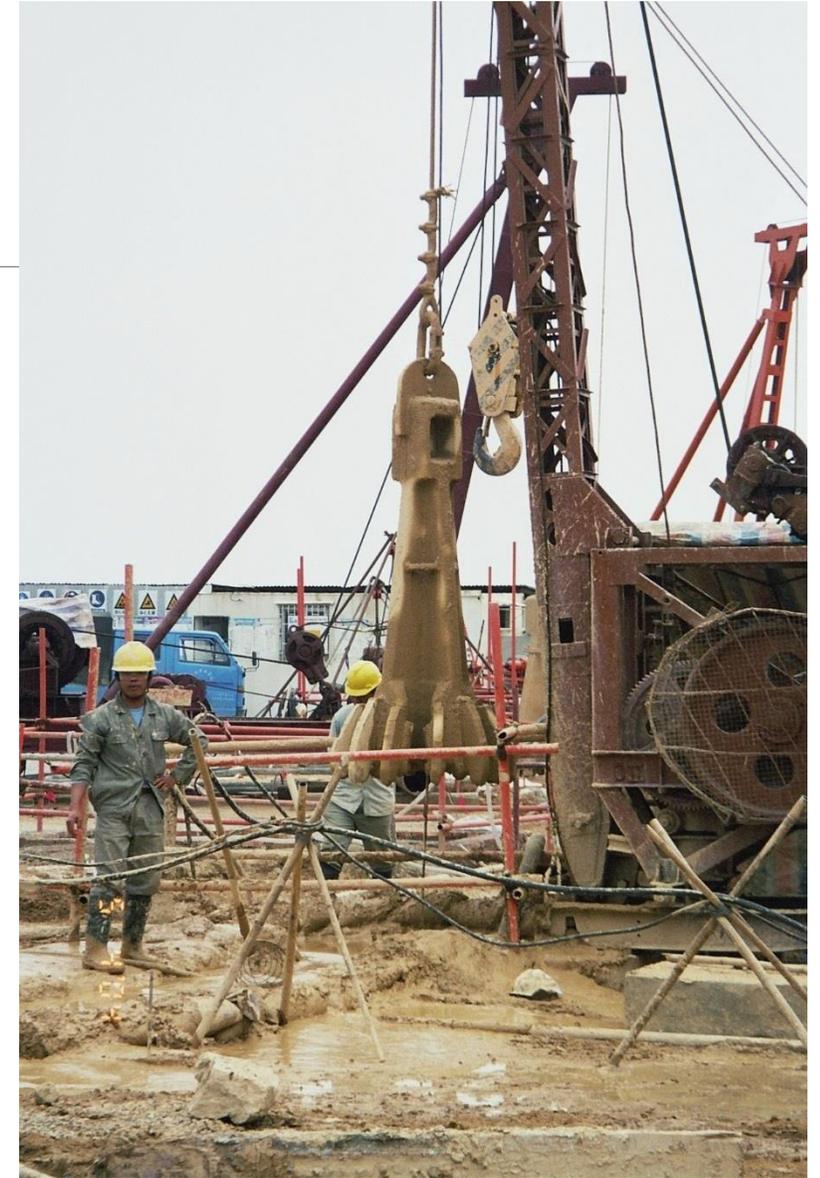
Coupe géologique



Evolution progressive de la conception des pieux

- Décision : passer à des fondations plus raides verticalement et surtout plus raides horizontalement
- Passage de pieux Φ 600 à pieux Φ 1200 faits communément sur le site (fondations des réservoirs GNL)
- Problématique de l'évaluation des raideurs dynamiques des pieux
- Données de base : essai de pieu
- Tentative de corrélation avec les codes chinois GB 50040-96 Code for design of dynamic machine foundation

Pieux forés tubés de 1,20 m



Estimation des raideurs dynamiques latérales

The dynamic lateral stiffness of the pile can be assessed according to the following model :

Layer	Average thickness (m)	k (KN/m ³)	Pile lateral surface (m ²)	K (KN /ml)
Backfill out of water	3.20	60 000	12.06	724 000
Backfill under water	5.00	15 000	18.85	283 000
Silty sand	8.5	8 400	32.04	269 000
HW/ MW rock	Minimum 1.50	167 000	5.65	944 000

$$\text{Raideur latérale} = 724 + 283 + 269 + 944 = 2219 \text{ MN/ml}$$

$K_{pz} = n p k_{pz}$ (3.3.13-1)

式中 K_{pz} ——桩基抗压刚度(kN/m);

k_{pz} ——单桩的抗压刚度(kN/m);

n_p ——桩数;

C_{pr} ——桩周各层土的当量抗剪刚度系数(kN/);

A_{pr} ——各层土中的桩周表面积(m²);

C_{pz} ——桩尖土的当量抗压刚度系数(kN/);

A_p ——桩的截面积(m²).

$K_{pz} = C_{pr} \cdot A_{pr} + C_{pz} A_p$

A_{pr} : surface area of pile.

A_p : section area of pile.

Code for design of dynamic machine foundation >>

Estimation des raideurs dynamiques latérales

桩周土的当量抗剪刚度系数 C_{pr} 值(kN/m^3)

表 3.3.14

土的名称 <i>soil type</i>	土的状态 <i>soil state</i>	当量抗剪刚度系数 C_{pr} <i>equivalent shear stiffness factor C_{pr}</i>
mud 淤泥 <i>slush</i>	饱和 <i>saturation</i>	6000~7000
淤泥质土 <i>muddy soil</i>	天然含水量 45%~50% <i>natural moisture content</i>	8000
粘性土、粉土 <i>clay soil, silt</i>	软塑 <i>soft plastic</i>	7000~10000
	可塑 <i>plastic</i>	10000~15000
粉砂、细砂 <i>silt, fine sand</i>	稍密~中密 <i>a little densify, medium density</i>	10000~15000
	中砂、粗砂、砾砂 <i>medium sand, gravel sand</i>	稍密~中密 <i>medium density</i>
粗砂 <i>coarse sand</i>	稍密 <i>a little densify</i>	15000~20000
圆砾、卵石 <i>round gravel, grait</i>	中密 <i>medium density</i>	20000~30000

Calculs détaillés : déplacements tout d'abord inacceptables

- 8.1 Calculation program
- dynamic calculation shall be made using the software program “DFM”, with Chinese Codes, HQCEC has it's copyright.
- JH 1 When consider effect of embedment
- 0 When not consider effect of embedment

SHEET 1 GENERAL INFORMATION

1	2	3	4
NM(个)	NB(个)	NS(个)	ND(个)
1	6	0	1

SHEET 2 GENERAL INFORMATION

1	2	3	4	5
JJJ	GS(M3)	XL(M)	YL(M)	AT
2	1.9	7.6	7.85	0.03

SHEET 3 MACHINE PARTS WEIGHT AND LOCATION (TOTAL NM GROUP)

1	2	3	4
W(KG)	X(M)	Y(M)	Z(M)
37.1	3.638	4.078	4.5

SHEET 4 BASE PLATE, FOUNDATION, SOIL BLOCK DIMENSION AND LOCATION (TOTAL NB+NS GROUP) :

1	2	3	1	2	3	4	5	6	7	8
NA(个)	ELV(M)	H(M)	X(1)	Y(1)	$\Delta X(2)$	$\Delta Y(2)$	$\Delta X(3)$	$\Delta Y(3)$	$\Delta X(4)$	$\Delta Y(4)$
4	0	1.8	0	0	7.6	0	0	7.85	-7.6	0
4	1.8	1.58	2	0	3.6	0	0	7.85	-3.6	0
4	1.8	0.1	0	2.435	0.4	0	0	1.33	-0.4	0
4	1.8	0.34	0.748	6.775	0.85	0	0	0.73	-0.85	0
4	1.8	1.45	5.69	5.336	1.51	0	0	0.79	-1.51	0
4	1.8	0.1	7.2	2.735	0.4	0	0	1.33	-0.4	0

SHEET 5 GROUND STIFFNESS INFORMATION

1
KKK
1

SHEET 6 GROUND PARAMETER (地基刚度和阻尼比按规范计算即 KKK=1 时填)

1	2	3	4	5	6
[R](KN/M2)	CZ(KN/M3)	H(M)	JH	PJ	JD
250	40000	1.8	0	1	1

SHEET 7 PILE FOUNDATION DATA (当为桩基并按规范计算地基刚度即 JJJ=2 时填)

PILE DIAMETER $\Phi=1200\text{mm}$ $c_{ps} = 15 \times 10^5 \text{ kN/m}^3$ $c_{pz} = 20 \times 10^3 \text{ kN/m}^3$
 $A_p = \frac{1}{4} \pi D^2 = 0.25 \times 3.14 \times 1.2^2 = 1.13 \text{ m}^2$ $c_{ps1} = 12500 \text{ kN/m}^3$ $c_{ps2} = 3750 \text{ kN/m}^3$
 $c_{ps3} = 2750 \text{ kN/m}^3$ $A_{ps} = \pi D = 3.14 \times 1.2 = 3.77 \text{ m}$
 $CZH = c_{ps} \times A_{ps} + c_{pz} \times A_p = 12500 \times 3.77 \times 3.5 + 3750 \times 3.77 \times 4 + 2750 \times 3.77 \times 12 + 60000 \times 1.13 = 1023898 \text{ kN/m}$ $0.8/D = 0.8/1.2 = 0.667$
 $CZH = 1023898 \times 0.667 = 682940 \text{ kN/m}$

1	2	3	4
NH(根)	CZH(KN/M)	NSUP	HL(M)
4	682940	2	24

SHEET 8 PILE LOCATION (桩基时 JJJ=2 填)

1	2	3	4	5	6	7	8			
XH(1)(M)	YH(1)(M)	XH(2)(M)	YH(2)(M)	XH(3)(M)	YH(3)(M)	XH(4)(M)	YH(4)(M)			
1.2	1.2	6.45	1.2	6.45	6.65	1.2	6.65			

SHEET 11 COMPRESSOR INTERFERENCE FORCE DATA

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
NCO(NM)	PEX(M)	PEY(M)	PEZ(M)	PZ1(KN)	PX1(KN)	PXM1(KN.M)	PZF1(KN.M)	PZ2(KN)	PX2(KN)	PXM2(KN.M)	PZF2(KN.M)
420	3.8	3.25	4.5	0	1.233	10.724	37.442	0	0.243	10.724	5.26

SHEET 12 MOTOR INTERFERENCE FORCE DATA

1	2	3	4	5
PEX2(M)	PEY2(M)	PEZ2(M)	PZB(KN)	PXB(KN)
3.8	5.57	4.5	0	0

SHEET 13 AMPLITUDE CONTROL POINT'S COORDINATE

1	2	3
XLP(M)	YLP(M)	ZLP(M)
5.6	0	3.38

CommandButton

Prise en compte de la butée latérale du sol le long de la fondation + augmentation de la raideur des pieux

CALCUL INITIAL

○ $AZ = 1.55 < 7.5$ OK

$AX = 12.22 < 15$ OK

$AY = 5.56 < 7.5$ OK

CALCUL FINAL

$AZ = 1.84 < 7.5$ OK (Vertical Displacement of the Control Point)

$AX = 5.78 < 15$ OK (Horizontal Displacement of the Control Point)

$AY = 3.41 < 7.5$ OK (Horizontal Displacement of the Control Point)

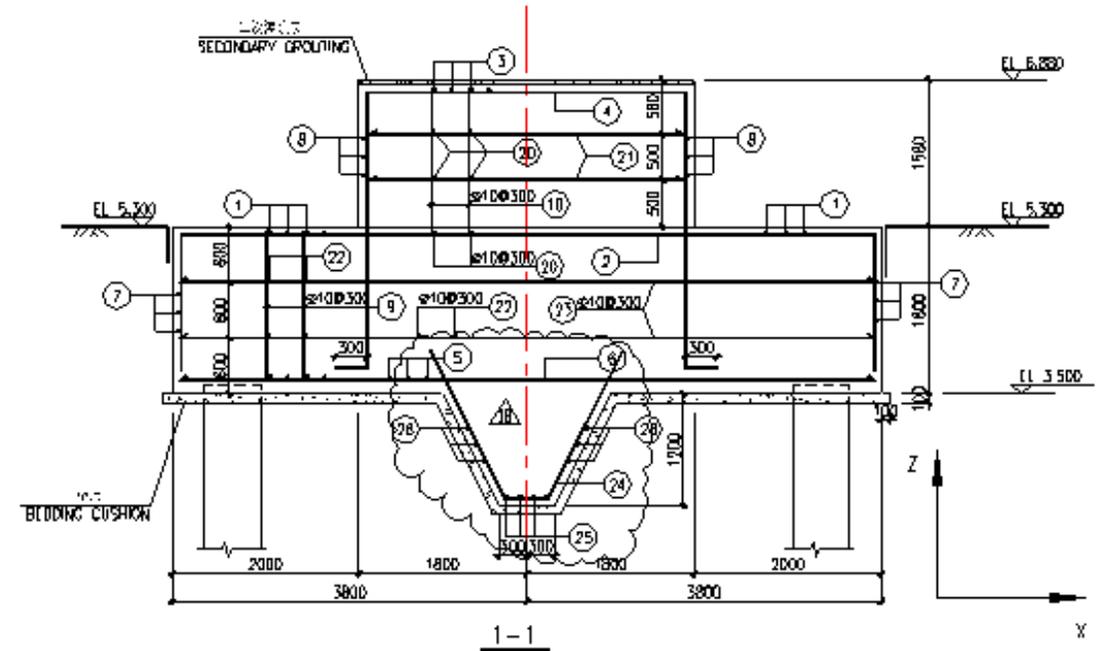
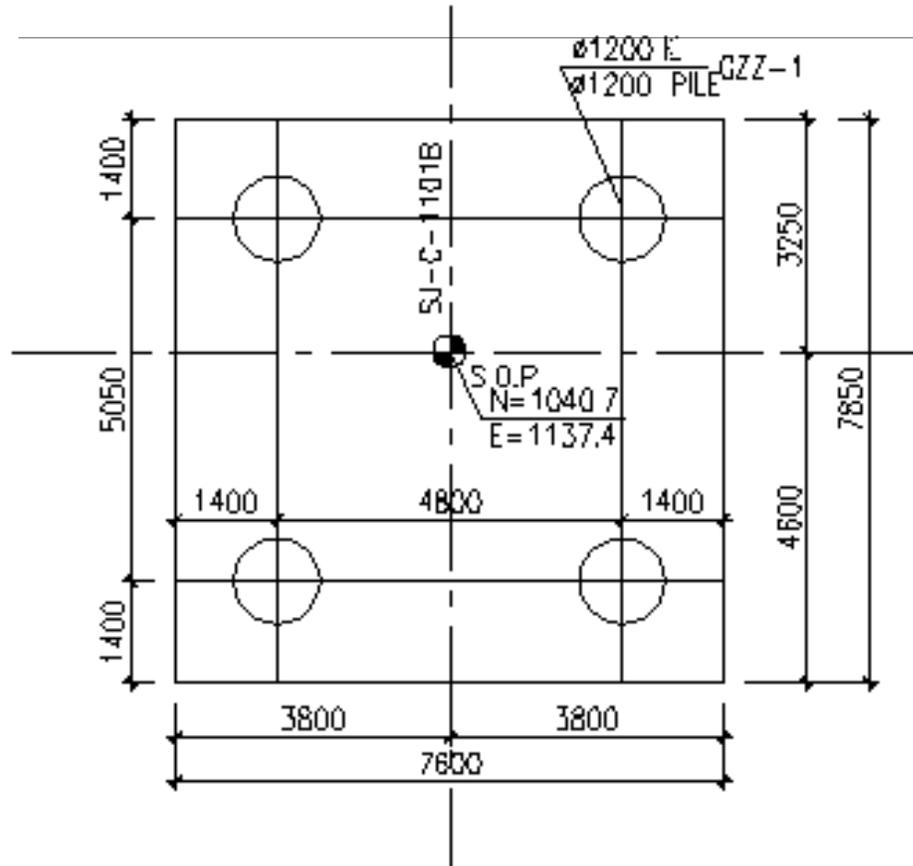
SHEET 7 PILE FOUNDATION DATA (当为桩基并按规范计算地基刚度即 JJJ=2 时填)

1	2	3	4
NH(根)	CZH(KN/M)	NSUP	HL(M)
4	2100000	2	33

PILE DIAMETER $\phi=1200\text{mm}$

| CZH is the vertical stiffness(2100MN/m) according the study report

Conception finale des fondations : incorporation d'une bêche pour augmenter la raideur latérale



Expertise des critères

COMMENTAIRES PRELIMINAIRES

La singularité des données précitées se situe au niveau des amplitudes vibratoires admissibles de la fondation : la valeur de +/- 7,5 μm est très faible pour ce type d'équipement, et nous ne l'avons jamais rencontré pour de telles machines.

A la fréquence de 7,0 Hz, un déplacement crête de 7,5 μm correspond en effet à une vitesse vibratoire crête de seulement 0,33 mm/s (soit : 0,23 mm/s RMS !).

Or, si l'on se réfère aux normes et aux valeurs usuelles mentionnées pour la plupart des constructeurs de compresseurs alternatifs, on peut considérer que les valeurs considérées comme admissibles sur cette affaire, sont de l'ordre de 10 fois inférieures à l'usage !

Il nous paraît très important de mentionner cette singularité au constructeur, afin d'obtenir une confirmation des valeurs admissibles.

Ne jamais perdre espoir...

De : ?? ?? [mailto:yuuichi_tsuda@ihi.co.jp]

Envoyé : jeudi 25 août 2005 07:11

À : Littardi Sabine

Cc : Pierron Jean-Michel; Delahaie Olivier; ?? ??; ?? ?; ?? ??

Objet : T653010 - BOG COMPRESSORS - PO 125163 - FOUNDATIONS

Dear Ms.Littardi,

We discussed the higher allowable vibration of foundation, and reach to below.

Max allowable vibration

H: 40 micro m (P-P)

A: 30 micro m (P-P)

V: 20 micro m (P-P)

Best Regards,

~~~~~  
Yuichi Tsuda

Rotating Machinery Dept., IHI

[TEL:+81-45-759-2446](tel:+81-45-759-2446) FAX:+81-45-759-2556

E-mail: [yuuichi\\_tsuda@ihi.co.jp](mailto:yuuichi_tsuda@ihi.co.jp)

# Merci pour votre attention

---

