

Pieux et palplanches

par **Pierre BOUSQUET**

Ingénieur de l'École des Travaux Publics

Directeur aux Entreprises Morillon Corvol Courbot (EMCC)

1. Définitions et rôle des pieux et palplanches.....	C 140 - 2
1.1 Définitions	— 2
1.2 Historique	— 2
1.3 Rôle des pieux.....	— 2
1.4 Rôle des palplanches.....	— 2
2. Types de pieux	— 3
2.1 Pieux fabriqués à l'avance et battus	— 3
2.2 Pieux fabriqués durant le battage	— 5
2.3 Pieux en béton coulés en place	— 10
2.4 Pieux spéciaux	— 13
3. Conditions d'emploi des pieux.....	— 14
3.1 Choix d'un type de pieux	— 14
3.2 Investigations préalables	— 14
3.3 Calcul des pieux.....	— 14
4. Mise en œuvre des pieux	— 20
4.1 Techniques de battage	— 20
4.2 Techniques de fonçage par vibration.....	— 22
4.3 Techniques de lancement	— 23
4.4 Techniques de forage	— 23
4.5 Problèmes d'exécution.....	— 23
4.6 Contrôle des pieux.....	— 24
4.7 Conditions économiques	— 24
5. Palplanches.....	— 24
5.1 Types de palplanches	— 24
5.2 Conditions d'emploi	— 27
5.3 Mise en œuvre des palplanches.....	— 29
5.4 Recommandations et contrôles.....	— 30
5.5 Dispositions particulières à l'emploi des palplanches	— 30
5.6 Conditions économiques	— 31
Pour en savoir plus.....	Doc. C 140

Les pieux et palplanches sont des éléments de construction et des matériels de chantier dont la mise en œuvre nécessite une bonne connaissance de la mécanique des sols.

Leurs rôles et leurs conditions de mise en œuvre sont exposés dans cet article.

1. Définitions et rôle des pieux et palplanches

1.1 Définitions

Les **pieux** sont des éléments de construction longs, à section circulaire ou polygonale, généralement noyés dans le sol.

Les **palplanches** sont des pièces longues à section *mince* qui, juxtaposées, constituent des parois planes ou cylindriques, appelées *rideaux*.

1.2 Historique

Des pilots en bois ont été utilisés dès l'époque préhistorique. De nombreux ouvrages anciens, conservés jusqu'à nos jours, sont fondés sur pieux, en particulier en Hollande et en Italie (le Campanile de Venise, datant de l'an 900, comporte des pieux battus).

Les pieux anciens étaient battus à la masse, ou à l'aide d'un mouton actionné à la main ; le relevage s'effectuait par un système de cordes et poulie (*sonnette à tiraude*, figure 1), et l'enfoncement était obtenu par la chute libre de la masse sur le pieu (*battage au mouton sec*).

Les palplanches, autrefois constituées de bois et utilisées pour des soutènements de talus, de berges, ou pour la protection contre les affouillements des ouvrages (piles de ponts), sont depuis le début du XX^e siècle fabriquées en béton armé et en acier. Actuellement, en égard aux performances exigées et aux facilités de mise en œuvre qu'il présente, seul l'acier est employé, les profilés recherchés étant obtenus par laminage à chaud ou profilage à froid.

En revanche, dans la fabrication des pieux, l'acier et le béton, quelquefois la conjugaison des deux, sont pratiquement aujourd'hui les seuls matériaux employés.

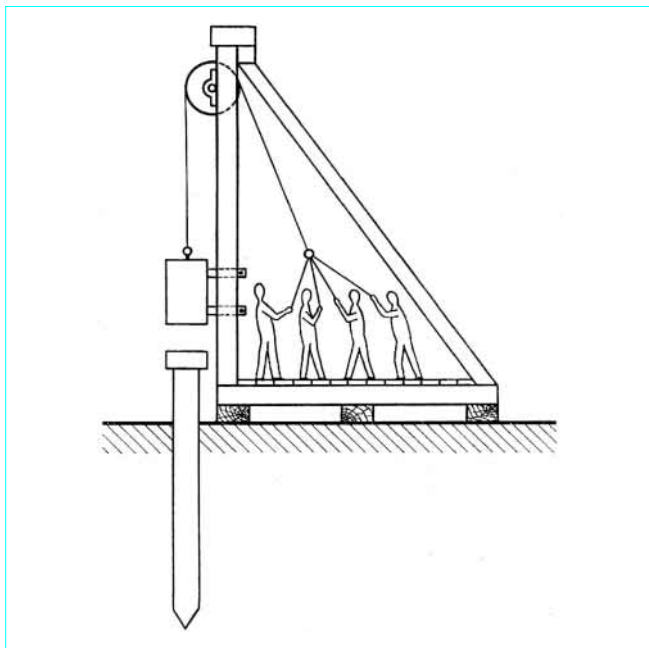


Figure 1 – Sonnette à tiraude

La conception des ouvrages où sont mis en œuvre ces éléments exige une bonne connaissance de la mécanique des sols (rubrique *Géotechnique. Mécanique des sols et des roches* dans ce traité).

1.3 Rôle des pieux

Lorsque le sol, situé immédiatement sous les ouvrages, ne présente pas des qualités de portance suffisantes, les pieux constituent une solution de fondations profondes (article *Fondations profondes* [C 248] dans ce traité).

La figure 2 montre les différents cas de résistance des pieux.

Les pieux contribuent parfois indirectement aux fondations, leur rôle étant uniquement d'améliorer les performances du sol, soit comme *pieux de compactage*, soit comme *drains* ; dans ce dernier cas, ils sont constitués de matériau drainant (sable, gravier, mèche de fibre, etc.).

Ils sont utilisés également pour résister à :

- des efforts latéraux (poussée des terres, efforts dus au vent ou au freinage, etc.) ;
- des efforts de traction : ils ont alors un rôle d'ancrage (fondations de pylônes).

Dans ces derniers cas, il est préférable de les incliner dans la direction des efforts résultants pour réduire les effets de flexion auxquels, par leur forme élancée, ils résistent mal.

1.4 Rôle des palplanches

L'emploi des palplanches dans les ouvrages est très diversifié (article *Murs de soutènement* [C 244]). Les rideaux obtenus par assemblage des palplanches les unes aux autres, grâce au système de joints ou d'agrafes dont elles sont dotées, peuvent :

- constituer des *batardeaux* en rivière, permettant la construction des ouvrages à l'abri de l'eau ;
- réaliser directement des *ouvrages définitifs* : quais, écluses, caissons de fondations, protection de berges, murs de soutènement ;
- établir des *écrans d'étanchéité* provisoires ou définitifs ;
- assurer des *blindages de fouilles*.

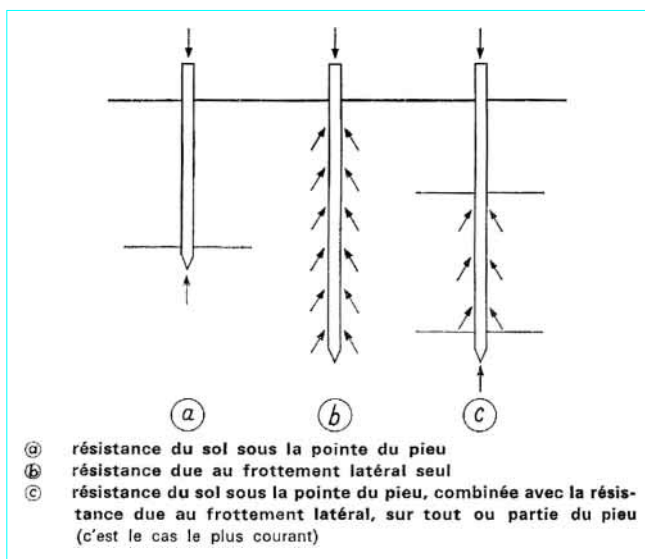


Figure 2 – Résistance des pieux

Les rideaux qu'elles constituent sont assimilables à des murs ou des parois supportant la poussée des terres en place, ou des remblais et des dénivelés d'eau (article *Ouvrages de soutènements. Poussée et butée* [C 242]).

Les palplanches sont, par construction, adaptées à leur emploi.

On distingue :

- les **palplanches à module ou à inertie** ;
- les **palplanches plates**.

Les premières se comportent comme des poutres verticales, mobilisant la butée au niveau de leur encastrement dans le sol et supportant les poussées dues aux dénivellations de terrain et d'eau (exemple : palplanches *Larssen*).

Les secondes permettent de réaliser des enveloppes cylindriques fermées, contenant des matériaux dont les poussées engendrent des tractions importantes dans les joints ; ces derniers sont, de ce fait, conçus pour résister à des efforts de l'ordre de 2 à 3 MN/m, portés à 5 MN/m tout récemment.

On distingue également les palplanches par la nature de l'acier qui les constitue, par leur masse au mètre carré de rideau ou au mètre de profil.

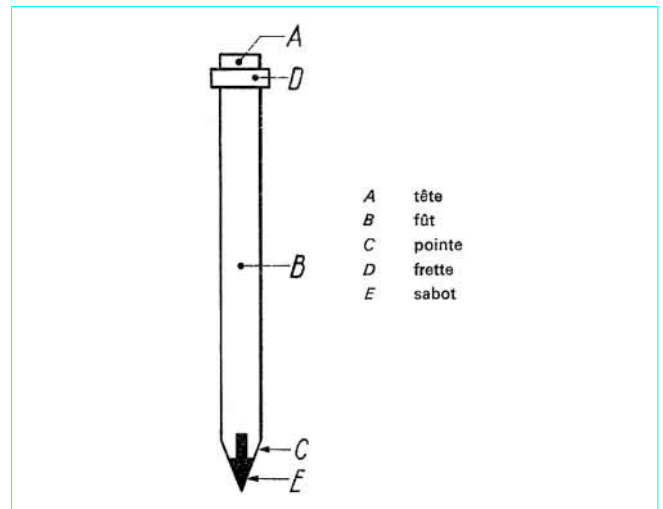


Figure 3 – Pieu en bois (pilot)

L'enture, réalisée suivant les différentes formes d'assemblage de charpente en bois, constitue toujours un point faible dans le pieu ; on la renforce quelquefois d'un chemisage métallique.

2.1.1.4 Caractéristiques de réception des pieux en bois

Les pieux en bois ne doivent pas comporter de gros nœuds, de fentes, de gerçures, de défauts préjudiciables à leur tenue et à leur résistance.

La ligne droite joignant le centre de la tête au centre de la pointe doit rester intérieure au pieu.

La flèche doit être inférieure à 1/100 de la longueur.

Le diamètre moyen est compris entre 1/30 et 1/40 de la longueur.

Le diamètre de la pointe ne peut être inférieur à 2/3 du diamètre de la tête.

2.1.1.5 Dimensions

Différentes formules donnent le diamètre du pieu en bois en fonction de la longueur.

— Formule de Peyronnet :

$$D = 0,24 + 0,015 (\ell - 4)$$

— Formule applicable pour $\ell > 6\text{ m}$:

$$D = 0,30 + 0,015 (\ell - 6)$$

— Formule courante :

$$D = 0,15 + 0,02 \ell$$

avec D (m) diamètre au milieu du pieu,
 ℓ (m) longueur du pieu.

2.1.1.6 Conditions d'emploi

Les pieux en bois ne constituent une solution avantageuse que pour supporter de faibles charges, lorsque l'on ne dispose pas de moyens importants de battage et lorsque le pieu n'aura pas à subir des alternances d'humidité et de sécheresse.

Le bois est un matériau organique. Il est sensible à l'attaque des rongeurs, des termites, des mollusques et au pourrissement.

2. Types de pieux

Plusieurs classements sont possibles : en fonction de la nature des pieux ou suivant les modes d'exécution. Nous avons opté pour ce dernier, car il permettra de dégager plus particulièrement les pieux exécutés en place, ce qui semble être de plus en plus la tendance actuelle.

2.1 Pieux fabriqués à l'avance et battus

2.1.1 Pieux en bois, ou pilots

2.1.1.1 Nature

Le bois employés est le plus couramment d'origine locale : le chêne blanc ou noir, le hêtre, le châtaignier, l'orme, l'aulne, le sapin maritime. On utilise plus rarement en Europe des essences plus nobles, ayant des performances plus élevées, comme les bois d'importation : le pin sylvestre, le greenheart, le teck, le douglas fin (pin d'Oregon).

2.1.1.2 Constitution

Les pieux comportent trois parties (figure 3) : la tête, le fût, la pointe. Dans le cas des pieux en bois, la tête et la pointe doivent être traitées particulièrement.

La tête, lors des battages, reçoit les chocs successifs du mouton, est frettée à l'aide d'une cerce métallique montée à chaud, pour éviter sa détérioration.

La pointe, qui a tendance à se désagréger lors de l'enfoncement, est protégée par un sabot métallique, qui doit être placé dans l'axe du pieu, pour éviter les déviations lors du battage.

2.1.1.3 Enture

Le dispositif d'aboutage appelé enture est justifié dans les cas suivants :

- le pieu est trop court pour atteindre le bon sol ou sa partie supérieure n'a pas les qualités requises ;
- les possibilités de battage (hauteur de sonnette, espace disponible) ne sont pas suffisantes pour la mise en œuvre de pieux ayant la longueur totale nécessaire.

Plusieurs **protections** sont possibles :

- les **traitements chimiques** :
 - imprégnation de pentachlorophénol à 5 %,
 - créosotage, efficace en particulier contre l'action des tarets ;
- les **traitements mécaniques**, pour améliorer la résistance à l'usure, aux chocs et aux frottements ;
 - protection des fûts dans leur partie vulnérable (zone d'alternance d'air et d'eau) par des chemises métalliques ou en béton, ou des applications par projections de béton, de gunite ou de goudron ;
 - bouclier métallique réalisé par mise en place, dans la zone sollicitée, de clous jointifs à larges têtes carrées (*mailletage*).

Les pieux en bois sont relativement fragiles. Des précautions particulières sont à prendre lors du battage : guidage soigné, masse du mouton et hauteur de chute adaptées aux possibilités du pieu.

On aura quelquefois intérêt à pratiquer le lançage, pour éviter les détériorations durant l'enfoncement.

2.1.1.7 Charges moyennes des pieux en bois

Ces charges sont données au tableau 1, en admettant un taux de travail à la compression de 30 daN/cm² [20].

Ces normes sont très sévères. On admet aujourd'hui un taux de 40 kg/cm² pour les résineux, pouvant être doublé pour le chêne.

Tableau 1 – Charges moyennes des pieux en bois				
Diamètre à la tête (cm)	Pieux ronds		Pieux carrés	
	Section (cm ²)	Charge (t)	Section (cm ²)	Charge (t)
35	962	29	1 225	37
32	804	24	1 024	30
30	706	21	900	27
25	490	15	625	19
20	314	9	400	12

2.1.2 Pieux en béton armé

Les pieux préfabriqués en béton armé (figure 4) sont de section carrée, pentagonale, hexagonale, octogonale, circulaire ou annulaire. Les angles peuvent être chanfreinés ou arrondis.

Ces pieux comportent des armatures longitudinales et transversales, déterminées essentiellement pour supporter les efforts de décollage, de levage et de mise en fiche, laquelle peut se faire par élingage en un, deux ou plusieurs points, grâce à des épingles prévues à cet effet lors du coulage des pieux. Le ferrailage est renforcé en tête, pour supporter les chocs du mouton ; en pied, pour améliorer la tenue de la pointe à l'enfoncement dans les terrains durs. La pénétration peut être facilitée par l'emploi du sabot.

Les dimensions transversales des pieux préfabriqués en béton armé peuvent varier de 0,20 à 0,60 m, et leurs longueurs de 10 à 30 m. Ils peuvent ainsi atteindre des masses unitaires considérables (15 à 20 t au maximum), ce qui pose des problèmes particuliers de mise en œuvre (3.4).

La préfabrication de ces pieux se fait généralement sur le site. Les longueurs à prévoir sont déterminées à la suite d'une campagne de sondage assez précise ou, mieux, de battage d'essai.

Ces pieux ont l'avantage d'être très résistants ; ils ont les performances et avantages du béton armé, et une bonne tenue dans le temps. En revanche, leur mise en œuvre requiert des moyens importants et bruyants qui les font écarter de plus en plus pour les applications en site urbain.

On améliore quelquefois leur résistance de pointe par un élargissement de la base (figure 5). Cette technique permet de réduire les effets de frottement négatif dans les couches de mauvais terrain subjacent au sol porteur, où le périmètre du fût est très réduit.

2.1.3 Pieux en béton précontraint

Ils présentent des avantages dus aux performances du béton précontraint :

- ils ont une plus grande résistance au battage ; il n'y a pas d'éclatement du béton ; le bardage est simplifié car l'élingage peut se faire en un point seulement ;
- ils sont susceptibles d'accepter des efforts de flexion, car leur section supporte mieux les efforts de traction.

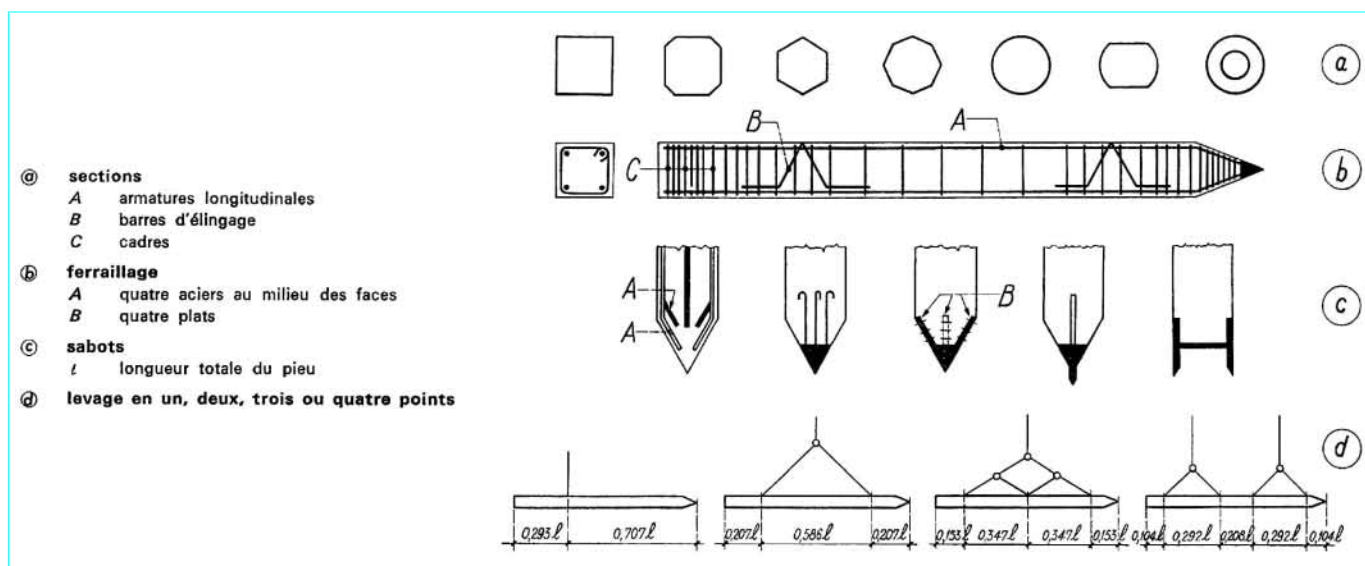


Figure 4 – Pieux préfabriqués en béton armé

Un perfectionnement de ce type de pieux consiste à utiliser des éléments circulaires creux assemblables. Des câbles de précontrainte traversant les trous longitudinaux aménagés à cet effet dans chaque anneau sont ensuite tendus pour donner au pieu les capacités attendues et la longueur souhaitée.

Ces pieux ont des performances très intéressantes, sans atteindre des masses excessives (de l'ordre de 20 à 30 % de moins que les pieux classiques en béton). Ils sont souvent employés pour les grands ouvrages en site maritime.

2.1.4 Pieux métalliques

C'est à la fin du XIX^e siècle, qui connut le démarrage de la construction en charpente métallique, que l'on commença à employer les pieux métalliques. À cette époque, on utilisait même des tubes avec sabots en fonte assemblés.

On emploie actuellement des pieux métalliques en acier, de section pleine (I, H, profilés divers, tableau 2) ou creuse (tubes circulaires ou octogonaux, caissons composés de palplanches ou de profils divers ; tableaux 3 et 4).

Les pieux du premier groupe constituent la meilleure solution pour traverser les terrains compacts ou contenant des obstacles isolés (galets, blocs lenticulaires), et pour obtenir une bonne pénétration dans le rocher. Ces pieux peuvent supporter des charges élevées : un pieu PH 300, de 128 cm² de section, porte 100 t. Leur longueur peut être facilement adaptée, en cours d'exécution, à la profondeur de fiche recherchée, par simple raboutage ou par soudure.

Ces derniers avantages sont également possibles avec les pieux à section tubulaire, pour lesquels on peut aussi exploiter la section intérieure, en les obturant à la base par un sabot avant battage, ou en vidant jusqu'au bon sol et en remplissant le vide ainsi obtenu, suivant le cas, par du sable ou du béton. On peut ainsi rechercher une bonne conjugaison des performances de l'acier et du béton, et obtenir une meilleure tenue au flambement.

Les pieux sont parfois réalisés dans des dimensions très importantes (∅ 1 200 à 1 800 mm) pour des fondations en site fluvial ou maritime, voire plus de 2 m pour constituer des ouvrages d'accostage ou d'amarrage, du type ducs d'Albe (article *Ports de commerce et de pêche. Aménagement et équipements intérieurs* [C 4 640]).

Tous ces pieux sont très performants. Leur approvisionnement, leur stockage et leur raboutage ne posent pas de problème majeur. Ils permettent des interventions rapides, mais ne correspondent pas toujours à la solution la plus économique, car leur coût est souvent grevé par les dispositions à prendre pour éviter les corrosions.

Ces traitements sont multiples :

- adjonction de cuivre ;
- revêtement de protection ;
- surépaisseur d'acier ;
- protection cathodique.

On a parfois intérêt à en conjuguer plusieurs.

Pour obtenir des sections mieux adaptées aux profils disponibles, aux performances recherchées, voire à la possibilité de combinaisons avec des rideaux de palplanches, on peut employer des pieux caissons (tableau 4).

Dans les sols mous, pour des charges relativement faibles (20 à 30 t), certains constructeurs ont utilisé le **pieu à vis** (figure 6). Sa surface portante est proportionnelle à la projection orthogonale de la totalité de la surface hélicoïdale.

On peut également citer, dans la catégorie des pieux métalliques, les pieux constitués par des gaines minces ondulées, battus à l'aide d'un mandrin pneumatique, et remplis de béton après relèvement de ce dernier. Ce procédé de mise en œuvre est délicat ; il en est

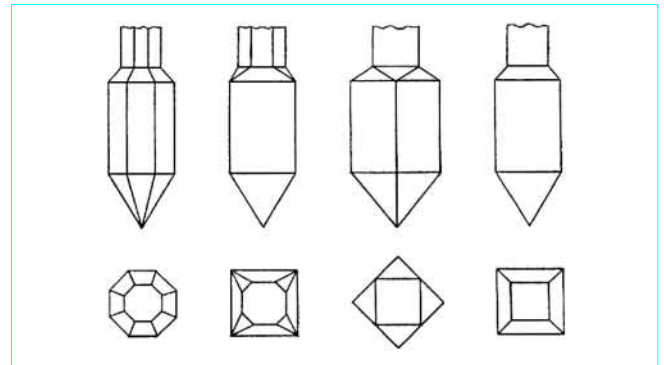


Figure 5 – Pieux à base élargie

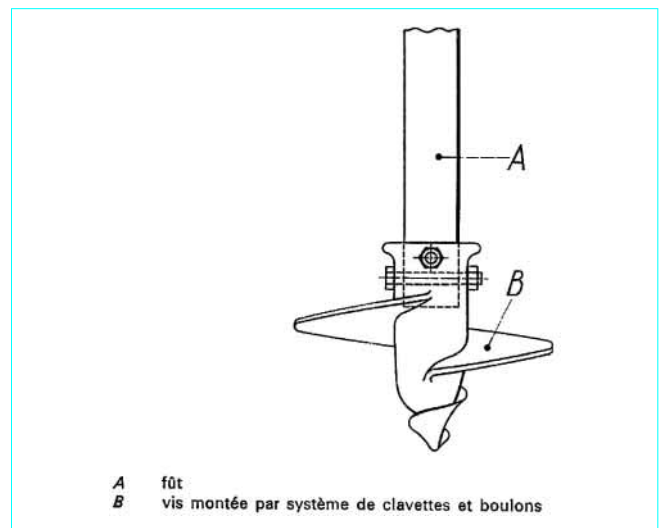


Figure 6 – Pieu à vis métallique

de même d'un système de pieux peu usité qui consiste à superposer des éléments métalliques cylindriques ou coniques, battus à l'aide d'un mandrin et remplis de béton après relèvement de celui-ci.

2.2 Pieux fabriqués durant le battage

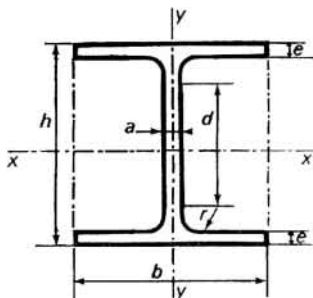
Ces pieux sont constitués d'éléments préfabriqués, dont l'assemblage se fait lors de la mise en œuvre.

2.2.1 Pieux en anneaux assemblables

Les anneaux peuvent être fabriqués en béton armé ou en béton précontraint.

Différents types d'assemblages sont utilisés, avec ou sans emboîtement d'un élément sur l'autre. La liaison peut se faire par soudure de couronne ou de chemise métallique, ou par collage à la résine des interfaces de béton. Nous avons vu (§ 2.1.3) que la continuité des armatures peut être également assurée.

Tableau 2 – Pieux PH : caractéristiques mécaniques



Profil	Force portante (kN)	Dimensions						Masse (kg/m)	Section acier (cm ²)	Section de pointe b · h (cm ²)	Caractéristiques rapportées à l'axe neutre						Moment d'inertie de torsion J (cm ⁴)	Périmètre (rectangle circonscrit) 2(h + b) (mm)	
		h (mm)	b (mm)	a (mm)	e (mm)	r (mm)	d (mm)				I _x (cm ⁴)	I _x /v _x (cm ³)	i _x (cm)	I _y (cm ⁴)	I _y /v _y (cm ³)	i _y (cm)			
PH 180	1	370	169	182,5	8,5	8,5	15	122	36,01	45,88	308	2 351	278,2	7,16	863	94,6	1,34	13,23	703
	2	440	172,6	184,3	10,3	10,3	15	122	43,61	55,55	318	2 907	336,8	7,23	1 078	116,9	1,40	23,70	713,8
	3	580	179	187,5	13,5	13,5	15	122	57,36	73,08	336	3 971	443,7	7,37	1 488	158,7	4,51	54,03	733
	4	700	184,2	190,1	16,1	16,1	15	122	68,78	87,62	350	4 911	533,2	7,49	1 851	194,8	4,60	92,54	748,6
PH 200	1	440	188	202,5	9	9	18	134	42,81	54,53	381	3 473	369,5	7,98	1 249	123,3	4,79	17,47	781
	2	480	190	203,5	10	10	18	134	47,48	60,48	387	3 892	409,7	8,02	1 408	138,4	4,82	24,04	787
	3	700	199	208	14,5	14,5	18	134	68,88	87,75	414	5 920	595,0	8,21	2 183	209,9	4,99	74,44	814
	4	790	202,4	209,7	16,2	16,2	18	134	77,14	98,26	424	6 750	667,0	8,29	2 500	238,4	5,04	104,4	824,2
PH 220	1	530	208	223	10	10	18	152	51,95	66,18	464	5 154	495,6	8,82	1 852	166,1	5,29	26,42	862
	2	620	211,6	224,8	11,8	11,8	18	152	61,24	78,02	476	6 180	584,1	8,90	2 240	199,3	5,35	43,65	872,8
	3	800	218	228	15	15	18	152	78,01	99,38	497	8 116	744,5	9,04	2 972	260,7	5,47	90,56	892
	4	990	225	231,5	18,5	18,5	18	152	96,72	123,22	521	10 406	924,9	9,19	3 840	331,8	5,58	171,7	913
PH 240	1	640	228	243,5	11	11	21	164	62,81	80,02	555	7 480	656,1	9,67	2 654	218,0	5,76	38,43	943
	2	700	230	244,5	12	12	21	164	68,44	87,19	562	8 219	714,7	9,71	2 931	239,8	5,80	50,04	949
	3	890	236,6	247,8	15,3	15,3	21	164	87,24	111,13	586	10 780	911,2	9,85	3 893	314,2	5,92	104,7	968,8
	4	1 260	249	254	21,5	21,5	21	164	123,48	157,30	632	16 107	1 294	10,12	5 899	464,4	6,12	295,7	1 006
PH 260	1	700	247	263,5	11	11	24	177	68,82	87,66	651	9 690	784,6	10,51	3 363	255,3	6,19	11,70	1 021
	2	790	250	265	12,5	12,5	24	177	77,97	99,32	663	11 106	888,5	10,57	3 888	293,4	6,26	61,44	1 030
	3	1 030	257,4	268,7	16,2	16,2	24	177	100,84	128,45	692	14 787	1 149	10,73	5 256	391,2	6,40	135,0	1 052,2
	4	1 430	269,8	274,9	22,4	22,4	24	177	140,12	178,50	742	21 591	1 600	11,00	7 791	566,8	6,61	362,8	1 089,4
PH 280	1	790	267	283,5	11,5	11,5	24	196	77,09	98,21	757	12 715	952,4	11,38	4 377	308,8	6,68	51,39	1 101
	2	890	270	285	13	13	24	196	86,95	110,77	770	14 493	1 074	11,44	5 028	352,8	6,74	74,51	1 110
	3	1 300	282	291	19	19	24	196	127,08	161,89	821	22 129	1 569	11,69	7 829	538,1	6,95	236,0	1 146
	4	1 590	290,4	295,2	23,2	23,2	24	196	155,84	198,53	857	27 992	1 928	11,87	9 987	676,6	7,09	434,1	1 171,2
PH 300	1	920	287	304	12,5	12,5	27	208	90,28	115,01	872	17 179	1 197	12,22	5 868	386,1	7,14	70,80	1 182
	2	1 030	290	305,5	14	14	27	208	100,86	128,48	886	19 381	1 337	12,28	6 671	436,7	7,21	99,81	1 191
	3	1 410	300,6	310,8	19,3	19,3	27	208	138,78	176,80	934	27 641	1 839	12,50	9 690	623,5	7,40	264,7	1 222,8
	4	1 590	305,4	313,2	21,7	21,7	27	208	156,25	199,04	957	31 635	2 072	12,61	11 153	712,2	7,49	378,2	1 237,2
PH 360	1	1 260	346	330	15,5	15,5	27	261	123,55	157,38	1 142	33 431	1 932	14,57	9 307	564,0	7,69	151,3	1 352
	2	1 420	350	330	17,5	17,5	27	261	138,85	176,88	1 155	37 948	2 168	14,65	10 511	637,0	7,71	217,7	1 360
	3	1 600	371,5	330	19,5	19,5	27	278,5	156,84	199,80	1 226	47 488	2 556	15,42	11 717	710,1	7,66	306,6	1 403
PH 400	1	1 430	386	330	17	17	27	298	139,97	178,30	1 274	46 208	2 394	16,10	11 211	618,9	7,57	207,1	1 432
	2	1 590	390	330	19	19	27	298	155,85	198,54	1 287	51 903	2 662	16,17	11 417	691,9	7,58	289,2	1 440

Tableau 3 – Tubes circulaires : caractéristiques mécaniques

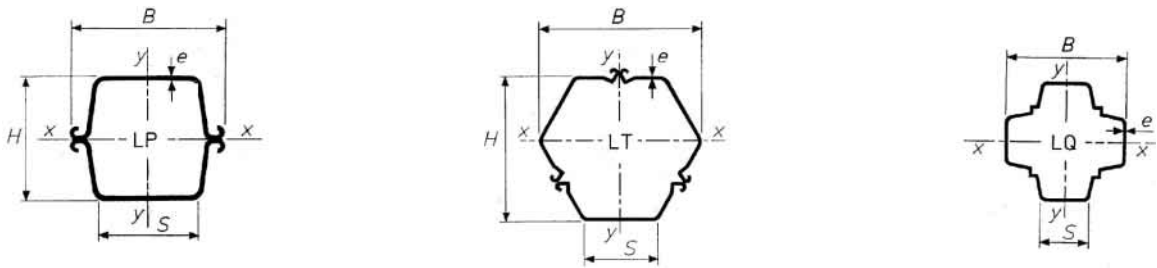
D	Gamme courante						Gamme API					
	e	A	S	ρ	I	I/v	e	A	S	ρ	I	I/v
193,7	4	270,84	23,83	6,708	1 072	110						
	4,5	267,93	26,74	6,691	1 197	123						
	5	265,03	29,64	6,673	1 320	136						
	6	259,29	35,38	6,639	1 559	161						
219,1	4	349,99	27,03	7,606	1 563	142	4,78	344,84	32,18	7,579	1 848	168
	4,5	346,69	30,33	7,588	1 747	159	5,16	342,34	34,68	7,566	1 985	181
	5	343,39	33,63	7,571	1 928	175	5,56	339,72	37,29	7,552	2 217	194
	6	336,86	40,16	7,537	2 281	208	6,35	334,58	42,44	7,525	2 403	219
	7	330,38	46,64	7,502	2 625	239	7,04	330,12	46,90	7,501	2 639	240
	8	323,97	53,05	7,468	2 959	270						
244,5	4	439,29	30,22	8,504	2 185	178	5,56	427,77	41,73	8,450	2 980	243
	4,5	435,58	33,92	8,486	2 443	199						
	5	431,89	37,62	8,469	2 698	220						
	6	424,55	44,95	8,434	3 198	261						
	7	417,28	52,22	8,400	3 685	301						
8	410,07	59,43	8,366	4 160	340							
273,0	4	551,54	33,80	9,511	3 058	224	4,78	545,07	40,27	9,484	3 623	265
	4,5	547,39	37,95	9,494	3 421	250	5,16	541,93	43,41	9,471	3 894	285
	5	543,25	42,09	9,476	3 780	276	5,56	538,63	46,71	9,457	4 178	306
	6	535,02	50,32	9,442	4 487	328	6,35	532,15	53,19	9,430	4 730	346
	7	526,85	58,49	9,407	5 177	379	7,09	526,12	59,22	9,404	5 238	383
	8	518,74	66,60	9,373	5 851	428	7,80	520,36	64,98	9,380	5 718	418
323,8	4	783,27	40,18	11,307	5 138	317	4,78	775,55	47,90	11,280	6 095	376
	4,5	778,32	45,13	11,290	5 753	355	5,16	771,80	51,65	11,267	6 557	405
	5	773,38	50,07	11,272	6 363	393	5,56	767,87	55,58	11,253	7 039	434
	6	763,55	59,90	11,237	7 565	467	6,35	760,13	63,32	11,225	7 980	492
	7	753,79	69,66	11,203	8 744	540	7,14	752,43	71,02	11,198	8 907	550
	8	744,09	79,36	11,168	9 900	611	7,92	744,86	78,59	11,171	9 808	605
							8,38	740,42	83,03	11,155	10 334	638
355,6	4	948,96	44,18	12,431	6 828	384	4,78	940,46	52,68	12,404	8 106	455
	4,5	943,51	49,63	12,414	7 649	430	5,16	936,33	56,80	12,391	8 722	490
	5	938,07	55,07	12,396	8 463	476	5,33	934,49	58,65	12,385	8 996	506
	6	927,24	65,89	12,362	10 070	566	5,56	932,00	61,14	12,377	9 366	526
	7	916,48	76,66	12,327	11 649	655	6,35	923,47	69,67	12,349	10 626	597
	8	905,78	87,36	12,292	13 201	742	7,14	914,98	78,16	12,322	11 868	667
						7,92	906,63	86,50	12,295	13 078	735	
406,4	4	1 246,60	50,56	14,227	10 236	503	4,78	1 236,86	60,31	14,200	12 161	598
	4,5	1 240,35	56,81	14,210	11 473	564	5,16	1 232,12	65,04	14,187	13 091	644
	5	1 234,11	63,05	14,192	12 700	625	5,56	1 227,15	70,01	14,173	14 064	692
	6	1 221,69	75,47	14,157	15 128	744	6,35	1 217,36	79,80	14,145	15 969	785
	7	1 209,33	87,83	14,123	17 519	862	7,14	1 207,61	89,55	14,118	17 851	878
	8	1 197,04	100,12	14,088	19 873	978	7,92	1 198,02	99,14	14,091	19 686	968
	9	1 184,80	112,36	14,053	22 192	1 092	3,74	1 187,98	109,18	14,062	21 593	1 062
	10	1 172,63	124,53	14,019	24 475	1 204	9,52	1 178,47	118,69	14,035	23 384	1 150
457,2	4	1 584,78	56,95	16,023	14 622	639	4,73	1 573,79	67,93	15,996	17 384	760
	4,5	1 577,73	63,99	16,006	16 396	717	5,56	1 562,84	78,88	15,969	20 117	880
	5	1 570,70	71,03	15,988	18 158	794	6,35	1 551,79	89,94	15,941	22 856	999
	6	1 556,68	85,04	15,953	21 646	946	7,14	1 540,77	100,95	15,914	25 566	1 118
	7	1 542,72	99,00	15,918	25 088	1 097	7,92	1 529,94	111,78	15,886	28 214	1 234
	8	1 528,83	112,89	15,884	28 484	1 246	8,74	1 518,59	123,13	15,858	30 967	1 354
	9	1 515,00	126,72	15,849	31 834	1 392	9,52	1 507,84	133,89	15,831	33 558	1 467
	10	1 501,24	140,49	15,814	35 138	1 537						

D (mm) diamètre extérieur. S (cm²) section du tube. I (cm⁴) moment d'inertie.
e (mm) épaisseur. ρ (cm) rayon de giration. I/v (cm³) module d'inertie.
A (cm²) section intérieure.

Tableau 3 – Tubes circulaires : caractéristiques mécaniques (suite)

D	Gamme courante						Gamme API					
	e	A	S	ρ	I	I/v	e	A	S	ρ	I	I/v
508,0	4,5	1 955,64	71,18	17,802	22 558	888	5,56	1 939,06	87,76	17,765	27 697	1 090
	5	1 947,81	79,01	17,784	24 990	983	6,35	1 926,75	100,07	17,737	31 485	1 239
	6	1 932,20	94,62	17,749	29 811	1 173	7,14	1 914,48	112,34	17,709	35 236	1 387
	7	1 916,65	110,17	17,714	34 574	1 361	7,92	1 902,40	124,42	17,682	38 905	1 531
	8	1 901,16	125,66	17,679	39 279	1 546	8,74	1 889,74	137,08	17,654	42 725	1 682
	9	1 885,74	141,08	17,645	43 928	1 729	9,52	1 877,74	149,08	17,627	46 323	1 823
	10	1 870,37	156,45	17,610	48 520	1 910	10,31	1 865,62	161,20	17,599	49 932	1 965
558,8	4,5	2 374,10	78,36	19,598	30 097	1 077	5,56	2 355,82	96,63	19,560	36 975	1 323
	5	2 365,47	86,99	19,580	33 352	1 193	6,35	2 342,25	110,20	19,533	42 050	1 505
	6	2 348,26	104,20	19,545	39 807	1 424	7,14	2 328,72	123,74	19,505	47 080	1 685
	7	2 331,11	121,34	19,510	46 192	1 653	7,92	2 315,39	137,06	19,478	52 005	1 861
	8	2 314,03	138,43	19,475	52 507	1 879	8,74	2 301,43	151,03	19,450	57 136	2 044
	9	2 297,01	155,45	19,440	58 753	2 102	9,52	2 288,18	164,27	19,422	61 973	2 218
	10	2 280,05	172,41	19,406	64 930	2 323	10,31	2 274,70	177,65	19,395	66 831	2 391
609,6	5	2 823,66	94,67	21,376	43 397	1 423	6,35	2 798,29	120,34	21,239	54 748	1 796
	6	2 804,85	113,77	21,341	51 820	1 700	7,14	2 783,49	135,13	21,301	61 320	2 011
	7	2 786,11	132,51	21,306	60 159	1 973	7,92	2 768,92	149,70	21,274	67 757	2 223
	8	2 767,43	151,19	21,271	68 414	2 244	8,74	2 753,65	164,98	21,245	74 470	2 443
	9	2 748,81	169,81	21,236	76 587	2 512	9,52	2 739,16	179,47	21,218	80 804	2 651
	10	2 730,26	188,36	21,202	84 677	2 778	10,31	2 724,52	194,10	21,191	87 168	2 859
	11	2 711,77	206,86	21,167	92 684	3 040	11,13	2 709,37	209,26	21,162	93 720	3 074
660,4	6	3 301,99	123,35	23,137	66 035	1 999	6,35	3 294,86	130,47	23,125	69 776	2 113
	7	3 281,65	143,69	23,102	76 691	2 322	7,14	3 278,80	146,53	23,097	78 175	2 367
	8	3 261,37	163,96	23,067	87 248	2 642	7,92	3 262,99	162,34	23,070	86 407	2 616
	9	3 241,16	184,17	23,032	97 707	2 959	8,74	3 246,41	178,92	23,041	94 997	2 876
	10	3 221,01	204,32	22,997	108 069	3 272	9,52	3 230,67	194,66	23,014	103 107	3 122
	11	3 200,92	224,41	22,963	118 335	3 583	10,31	3 214,77	210,56	22,987	111 262	3 369
	12	3 180,90	244,44	22,928	128 504	3 891	11,13	3 198,31	227,02	22,958	119 662	3 623
711,2	6	3 839,65	132,92	24,933	82 637	2 323	6,35	3 831,97	140,61	24,921	87 329	2 455
	7	3 817,72	154,86	24,898	96 003	2 699	7,14	3 814,65	157,92	24,893	97 865	2 752
	8	3 795,85	176,73	24,863	109 255	3 072	7,92	3 797,60	174,98	24,866	108 199	3 042
	9	3 774,04	198,54	24,828	122 392	3 441	8,74	3 779,70	192,87	24,837	118 988	3 346
	10	3 752,29	220,28	24,793	135 417	3 808	9,52	3 762,72	209,85	24,810	129 179	3 632
	11	3 730,61	241,97	24,758	148 328	4 171	10,31	3 745,56	227,01	24,782	139 431	3 921
	12	3 708,99	263,59	24,724	161 128	4 531	11,13	3 727,80	244,78	24,754	149 999	4 218
762,0	6	4 417,86	142,50	26,729	101 813	2 672	6,35	4 409,62	150,74	26,717	107 603	2 824
	7	4 394,33	166,03	26,694	118 313	3 105	7,14	4 391,04	169,32	26,689	120 613	3 165
	8	4 370,86	189,50	26,659	134 682	3 534	7,92	4 372,74	187,62	26,662	133 378	3 500
	9	4 347,46	212,90	26,624	150 920	3 961	8,74	4 353,54	206,82	26,633	146 711	3 850
	D (mm)	diamètre extérieur.		S (cm ²)	section du tube.		I (cm ⁴)	moment d'inertie.				
	e (mm)	épaisseur.		ρ (cm)	rayon de giration.		I/v (cm ³)	module d'inertie.				
	A (cm ²)	section intérieure.										

Tableau 4 – Caissons métalliques : caractéristiques mécaniques



Profil	B (mm)	H (mm)	e (mm)	S (mm)	Péri- mètre (cm)	Section acier (cm ²)	Section totale (cm ²)	Masse (1) (kg/m)	Module de résistance		Moment d'inertie		Rayon minimal de giration	
									m_x (cm ³)	m_y (cm ³)	I_x (cm ⁴)	I_y (cm ⁴)	r_x (cm)	r_y (cm)
LP SL 2	483	171	6,0	336	136	83	550	65	375	780	3 250	18 800	6,3	13,8 14,3 15,8 16,9 16,3
SL 3	483	241	7,1	316	147	97	930	76	625	1 040	7 550	26 100	8,8	
LP RL 85	633	311	9,0	359	162	141	1 520	111	1 220	1 840	18 500	58 300	11,5	
RL 120	633	351	9,9	413	172	164	1 780	128	1 670	2 150	29 300	68 000	13,4	
LP 31	485	190	9,5	276	118	115	730	90	560	1 120	5 400	27 200	6,8	
LP IV	442	354	15,5	320	147	191	1 230	150	1 945	1 645	34 400	36 400	13,5	
V	466	400	24,0	300	170	255	1 570	200	3 075	2 100	61 500	48 800	13,8	
VI	464	500	23,5	310	152	311	1 810	244	4 170	2 770	104 000	67 200	14,3	
LP II n	436	314	9,5	310	138	124	1 100	98	1 050	1 220	16 500	26 600	11,5	
III n	436	336	13,0	320	142	158	1 180	124	1 520	1 470	25 500	32 000	12,7	
LP II s	533	385	12,3	342	164	177	1 600	139	1 905	1 775	36 700	47 700	14,4	
III s	536	428	14,1	324	172	201	1 760	158	2 350	2 130	50 300	57 100	15,8	
IV s	536	489	15,5	300	180	224	1 950	176	2 970	2 400	72 600	64 300	16,9	
V s	538	500	20,6	299	200	270	1 990	212	3 680	2 670	92 000	71 800	16,3	
LT SL 2	544	510	6,0	336	203	124	1 780	97	1 250	1 335	37 000		17,3	
SL 3	592	544	7,1	316	221	146	2 340	114	1 850	1 800	53 000		19,1	
LT RL 85	749	708	9,0	359	239	212	3 910	167	3 450	3 450	129 000		24,5	
RL 120	808	728	9,9	413	254	245	4 290	193	4 350	4 030	163 000		25,8	
LT 31	532	517	9,5	276	173	172	2 030	135	1 880	2 030	54 000		17,7	
LT IV	650	579	15,5	320	221	286	2 630	224	3 950	3 615	117 500		20,2	
V	700	610	24,0	300	255	322	3 320	300	5 750	5 370	188 000		22,2	
VI	774	690	23,5	310	228	466	3 100	366	6 840	6 720	260 000		23,6	
LT II n	620	545	9,5	310	204	186	2 410	146	2 470	2 195	68 000		19,0	
III n	640	565	13,0	320	212	238	2 530	186	3 160	2 845	91 000		19,5	
LT II s	750	650	12,3	342	246	265	3 560	208	4 240	3 850	144 500		23,3	
III s	780	690	14,1	324	258	302	3 780	237	4 920	4 635	178 500		24,3	
IV s	812	720	15,5	300	270	336	4 020	264	5 680	5 460	221 500		25,7	
V s	824	724	20,6	299	300	405	4 180	318	6 640	6 415	264 500		25,0	
LQ SL 2	640		6,0	336	272	165	3 350	130	2 970		89 700		23,3	
SL 3	711		7,1	316	294	194	4 100	152	3 410		121 000		25,0	
LQ RL 85	928		9,0	359	316	283	6 860	222	6 460		299 500		32,6	
RL 120	968		9,9	413	336	327	7 370	257	7 680		371 500		33,8	
LQ 31	660		9,5	276	227	229	3 670	180	3 900		128 500		23,6	
LQ IV	783		15,5	320	292	382	4 320	299	6 360		249 000		25,6	
V	845		24,0	300	340	510	5 260	400	9 560		406 000		28,2	
VI	940		23,5	310	304	622	5 560	488	11 410		536 000		29,3	
LQ II n	734		9,5	310	276	249	3 980	196	4 070		149 500		24,4	
III n	757		13,0	320	284	316	4 120	248	5 310		201 000		25,2	
LQ II s	902		12,3	342	328	354	6 090	278	7 050		318 000		30,0	
III s	949		14,1	324	344	403	6 390	316	8 170		387 500		31,0	
IV s	1 009		15,5	300	360	448	6 580	352	9 350		471 500		32,4	
V s	1 020		20,6	299	400	540	6 700	424	11 250		572 500		32,6	

(1) Les masses figurant dans ce tableau ne tiennent pas compte des masses des soudures.

Pour la mise en œuvre de ces pieux, on procède au battage d'un sabot par l'intermédiaire d'un mandrin sur lequel les anneaux sont enfilés ; la tête est adaptée pour leur transmettre une part relativement faible de l'énergie de battage, la majeure partie étant mobilisée pour l'enfoncement de la pointe. Le battage est conduit jusqu'au refus (§ 3.3.2) nécessité par la charge à supporter, des anneaux étant ajoutés au fur et à mesure de la profondeur de fiche obtenue (figure 7).

Ce procédé permet la réalisation de pieux battus dans des terrains hétérogènes où aucune prévision sur les longueurs de pieux n'est possible.

La mise en œuvre de tels pieux nécessite de nombreuses manutentions, ce qui actuellement les rend peu compétitifs ; par ailleurs, leurs charges portantes sont limitées, car souvent les performances des joints sont contestées.

On peut classer les *pieux West* dans cette catégorie de pieux (article *Fondations profondes* [C 248]).

2.2.2 Pieux métalliques à éléments assemblables

Nous classons ici les pieux métalliques constitués délibérément par des éléments de longueurs unitaires déterminées, en vue des commodités d'approvisionnement, de manutention et d'assemblage. Ce dernier s'effectue pratiquement toujours par soudure lors du battage, de façon à réaliser la longueur nécessaire.

Comme précédemment, ils permettent de réaliser des battages de pieux à longueur variable pour répondre à des cas particuliers résultant soit de la méconnaissance du sous-sol ou de son hétérogénéité, soit de l'insuffisance de hauteur disponible (hall d'usine, passage sous un pont, etc.), qui ne permettent pas la préfabrication avant mise en œuvre.

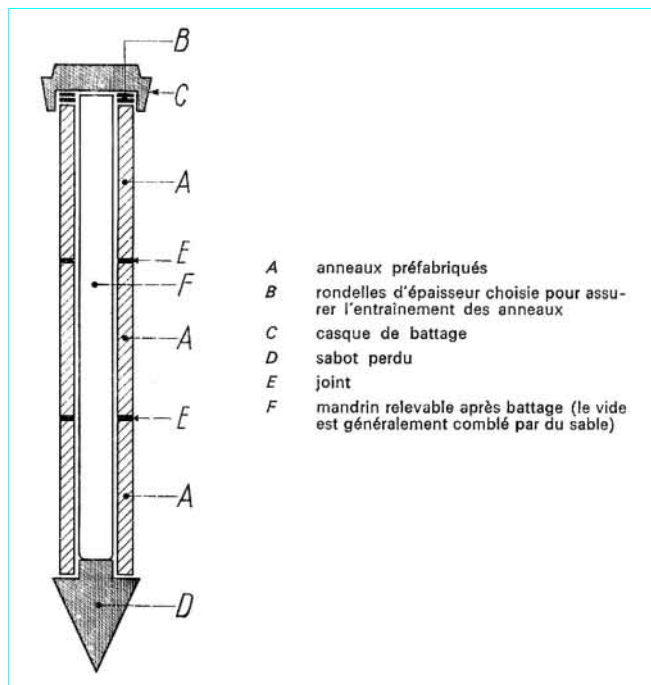


Figure 7 – Pieu en anneaux assemblables

Les difficultés de ce système résident, d'une part, dans la conduite de plusieurs battages simultanés de pieux, pour éviter d'être retardé par les aboutages et, d'autre part, dans les soins particuliers à apporter pour réaliser, quelquefois sur échafaudages, souvent aux intempéries, des soudures de qualité convenable.

Ces conditions doivent être sérieusement contrôlées si l'on veut bénéficier sans restriction, au droit des raccords, des performances maximales du pieu. On utilise, à cet effet, des systèmes de manchons ou d'éclisses.

2.3 Pieux en béton coulés en place

C'est un type de pieux très utilisé actuellement.

Le principe consiste à réaliser dans le sous-sol une cavité ayant la section demandée et la profondeur nécessaire, et à la remplir de béton. La méthode employée pour obtenir ce résultat caractérise les différents types de pieux coulés en place.

2.3.1 Pieux battus ou vibrés moulés dans le sol

Il existe un nombre important de types de pieux de cette famille ; nous ne pouvons ici qu'en citer quelques-uns.

2.3.1.1 Pieux simplex

Un tube métallique muni d'une pointe est enfoncé dans le sol par battage jusqu'au refus ; après mise en place du béton et damage de celui-ci, on retire le tube (figure 8).

Ce procédé est parfois amélioré, dans le cas des sols de mauvaise qualité, en utilisant deux tubes concentriques, la gaine intérieure d'épaisseur plus faible étant finalement laissée en place.

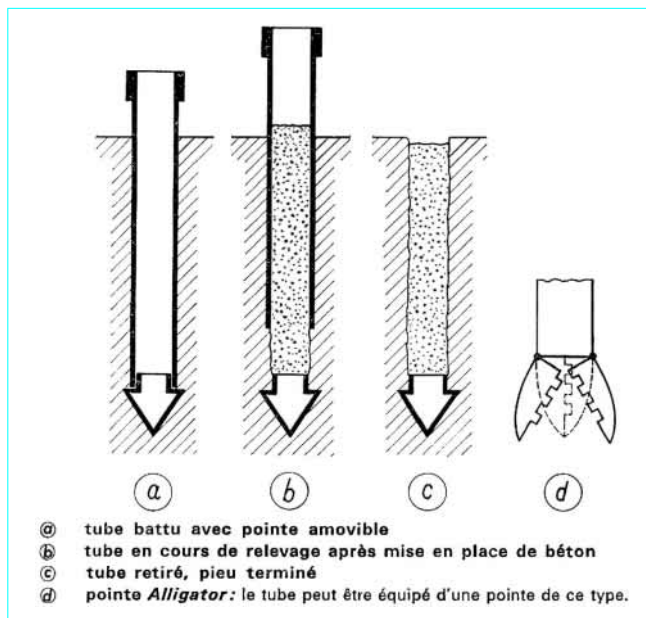


Figure 8 – Pieu simplex

2.3.1.2 Pieux express

Le tube provisoire est obturé à la base par un bouchon de béton très compact damé lors du fonçage. Un système de goulotte, à la partie supérieure, permet l'introduction du béton. Un mandrin de battage permet une action simultanée sur la tête du tube et sur le bouchon. Au fur et à mesure de l'augmentation de la masse de béton comprimé, le tube est relevé.

2.3.1.3 Pieux vibro

Le tube muni d'un sabot en fonte est foncé par battage à la cote voulue, puis il est rempli de béton à l'aide d'un gueulard placé en tête.

La particularité réside dans le mode d'extraction du tube : on utilise un système de mouton retourné, produisant à la fois le relevage du tube et le damage du béton. Ce dernier est ainsi vibré au rythme de 80 coups à la minute, alors que le tube se soulève par petites secousses suivies d'un mouvement de descente sur quelques centimètres, pour éviter toute infiltration d'eau ou de terrain.

Cette technique a évolué en fonction des matériels de battage, d'arrachage et de vibration. L'emploi des pieux battus vibrés dans le sol s'est considérablement répandu et est actuellement pratiqué par la plupart des spécialistes de fondation ; les sabots perdus sont maintenant constitués de disques de tôles renforcés par des cornières.

2.3.1.4 Pieux Franki

Le tube métallique provisoire est obturé par un bouchon de béton à peu près sec, pilonné par un mouton de 2 à 4 t.

C'est le battage de ce bouchon de béton qui entraîne le tube. Lorsque la profondeur voulue est atteinte, un battage énergique permet de chasser le bouchon dans le sol et de constituer ainsi un bulbe destiné à améliorer la capacité de portance.

Le relevage du tube se fait progressivement, en damant des coulées successives de béton. On obtient ainsi un fût constitué d'un ensemble de protubérances résultant de la compression du terrain aux différents niveaux (figure 9).

2.3.2 Pieux forés

Cette technique connaît le plus d'applications aujourd'hui, car elle évite les moyens de battage souvent exclus en site urbain et bénéficie des nombreux progrès effectués dans les équipements de forage.

La particularité des pieux forés est que leur volume dans le sol est obtenu par enlèvement de déblais, alors que dans les autres types il est obtenu par compression du sol lors de l'enfoncement du pieu.

Ces types de pieux présentent plusieurs avantages :

- ils permettent de réduire les installations ;
- ils ne nécessitent pas d'aire de coulage ou d'assemblage ;
- les armatures sont limitées aux besoins du pieu en place ;
- la rugosité du fût, voire la base élargie, permettent de bien exploiter les performances du sol dont on peut apprécier les qualités en examinant les produits de forage.

On doit, en revanche, surveiller et contrôler la qualité du terrain d'assise et celle du béton. Souvent, l'essai de charge est le seul moyen de s'assurer de la portance finale.

Les inconvénients essentiels résident dans la difficulté de contrôler l'homogénéité, la qualité du béton et les éventuelles diminutions de section par éboulement.

On peut distinguer les pieux forés suivant la technique employée pour réaliser le trou, c'est-à-dire effectuer le forage.

2.3.2.1 Pieux forés à la benne

Le procédé consiste à réaliser une excavation à l'aide d'une benne adaptée à la fois à son enfoncement dans le sol et au ramassage des matériaux : *benne oblongue à câbles*.

Suivant la qualité du sol, on utilise différentes bennes allant de la *benne à soupape* (figure 10a) au *hammergrab* (figure 10b). Ce dernier outil est particulièrement conçu pour les terrains durs dans lesquels il pénètre ouvert sous l'effet de son poids en chute libre.

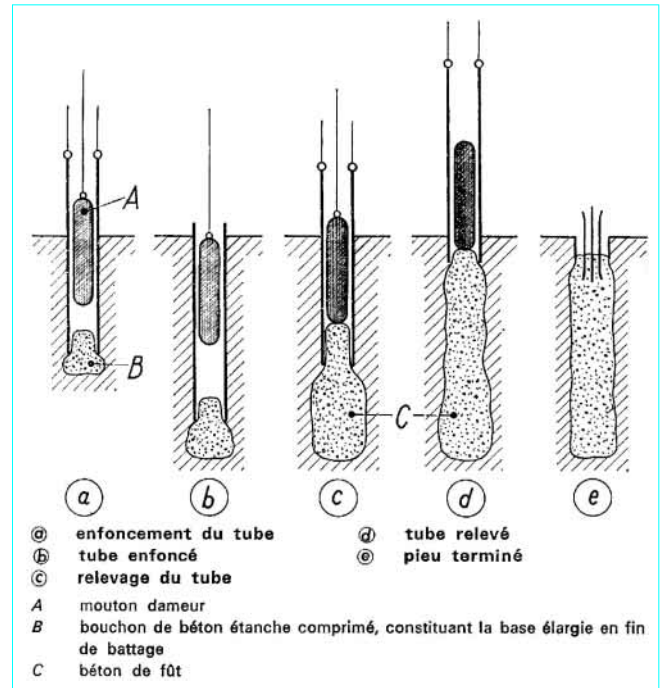


Figure 9 - Pieux Franki

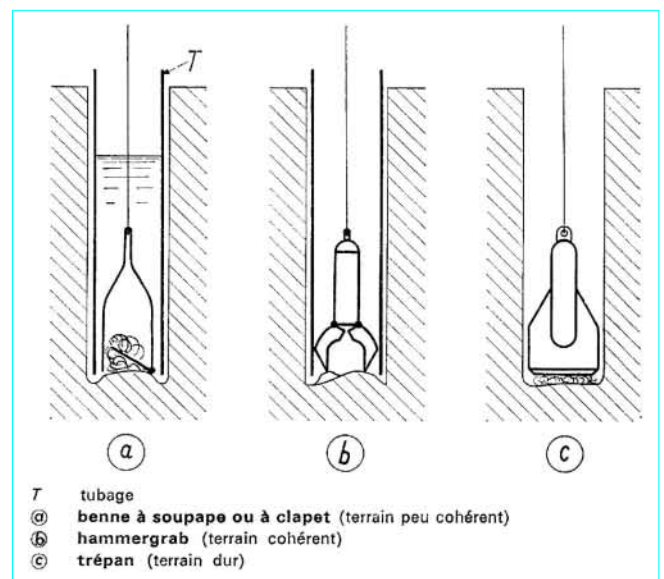


Figure 10 - Pieux forés à la benne

Si l'hammergrab n'est pas suffisant, en particulier dans le cas des marnes dures, des calcaires, des granits, etc., on précède son intervention par l'action d'un **trépan** (figure 10c) dont la forme peut être adaptée aux effets recherchés.

L'exécution du forage est la première particularité de ce type de pieux. La deuxième est le procédé utilisé lorsque le terrain ne s'y prête pas pour maintenir le trou durant le forage et jusqu'au coulage du béton. Deux techniques sont employées : l'une consiste à utiliser un tube métallique provisoire ou définitif, l'autre à employer une boue de forage (*bentonite*) qui ajoute à l'avantage de sa forte densité la propriété de réaliser sur les parois un film argileux, ou *cake*, qui améliore considérablement leur tenue.

Enfin, la troisième particularité est le mode de mise en place du béton : on peut soit utiliser une *benne à fond ouvrant*, soit employer la technique du *tube plongeur* (figure 11). Ce dernier procédé est pratiquement aujourd'hui le seul recommandé pour avoir la garantie d'un béton homogène et ayant les qualités requises, car il permet les remontées de laitance et d'éventuelles retombées de terrain.

Dans cette famille de pieux nous citerons particulièrement le procédé, dit *Benoto*, qui consiste à utiliser un tube provisoire muni à sa base d'une trousse coupante facilitant sa pénétration dans le sol, laquelle est obtenue par un effet de louvoisement réalisé par un système de vérins latéraux.

Le même mouvement est effectué au relevage du tube, ce qui diminue les effets de frottement et réduit ainsi les efforts à exercer sur les vérins verticaux qui constituent le dispositif de relèvement (machine *Benoto*).

Des procédés utilisant les avantages de la vibration ont également conduit à la construction de machines réunissant les mêmes principes d'exécution.

Se classent dans cette catégorie les pieux pouvant être réalisés à l'aide des bennes utilisées pour l'exécution de *parois moulées* dans le sol. Ces pieux, de section rectangulaire très importante (1 m x 3 m au maximum), appelés **pieux barrettes**, peuvent supporter des charges très élevées, de l'ordre de 1 500 t, et sont de

plus en plus employés dans les fondations des ouvrages très lourds : silos, centrales nucléaires, sidérurgie, etc. (article *Parois moulées. Ancrages* [C 252]).

2.3.2.2 Pieux forés en rotation

Le procédé consiste à utiliser des outils travaillant en rotation pour réaliser la cavité ; cette technique a été développée initialement pour les forages et les sondages.

Les performances des engins ont considérablement augmenté ; elles permettent aujourd'hui de traiter des diamètres très élevés en utilisant des outils à étages ou des élargisseurs adaptés à la dureté du terrain, et, en principe, capables d'attaquer tous les sols, si durs soient-ils.

Ils vont de la simple tarière au tricône, et sont mus soit par la rotation de l'axe qui les porte, entraîné en tête de pieu par un système de couronne et moteur (table de rotation), soit par l'énergie d'un fluide hydraulique, directement transmise au niveau de l'outil conçu pour la transformer en mouvement de rotation.

Les capacités de forage sont fonction des puissances disponibles, des performances d'outils et notamment de la hauteur de leurs supports, appelés couramment *kelly*, qui limite les possibilités en profondeur.

Dans ce type de pieux, on peut atteindre des diamètres de plus de 3 m et des profondeurs de plus de 60 m.

Comme précédemment (§ 2.3.2.1), suivant la nature des sols, on peut forer à sec, à l'intérieur d'une gaine ou à la boue que l'on utilise en circulation directe (le fluide est amené au niveau de l'outil en fond de forage par les tubes qui constituent les tiges de manœuvre) ou en circulation inverse (le fluide est déversé dans le trou de forage et remonté par les tiges de manœuvre).

Les techniques de mise en place du béton sont décrites au paragraphe 2.3.2.1.

Aux avantages des pieux forés déjà cités et aux performances de dimensions qui les caractérisent, il faut ajouter leur commodité et leur rapidité d'exécution eu égard aux moyens de plus en plus puissants réalisés par les constructeurs de matériels (Salzgitter, Wirth, Caldwell).

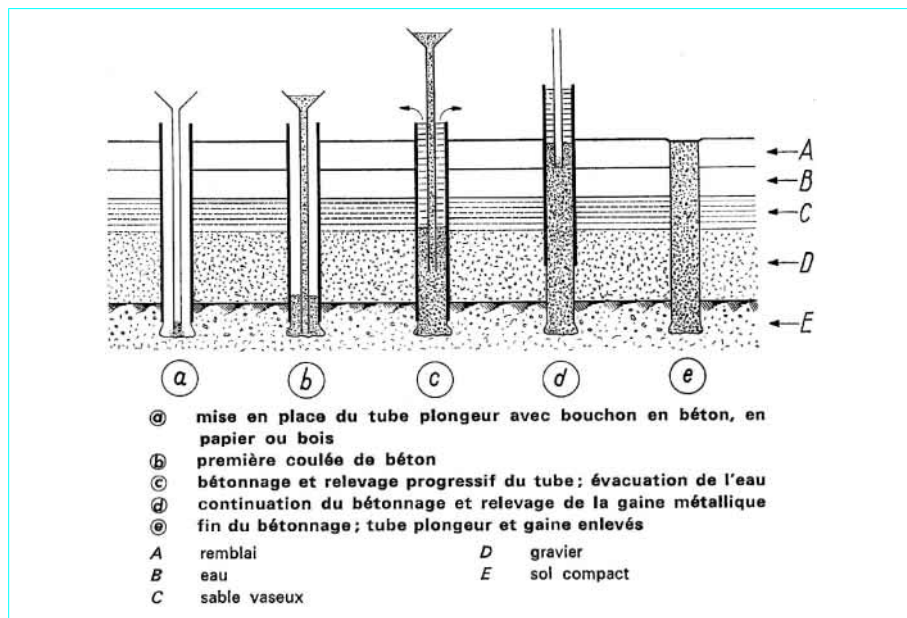


Figure 11 - Bétonnage au tube plongeur

2.4 Pieux spéciaux

Nous classons ici des pieux dont la mise en œuvre fait appel aux différentes techniques développées précédemment, mais qui sont plus particulièrement caractérisés par leur fonction.

2.4.1 Pieux traction-compression

Ces pieux sont destinés à résister à des efforts alternés de traction et de compression. Ils sont utilisés dans les ouvrages subissant des sollicitations variables en intensité et direction, par exemple :

- fondation de pylône assujéti aux effets des différents vents ;
- ouvrage de quai subissant successivement des efforts d'accostage et d'amarrage.

Pour obtenir des pieux ayant ces performances, on utilise des profilés métalliques dotés à la base d'un sabot plus large, pour réaliser dans le sol un vide qui sera injecté de mortier, lors du battage, pour constituer un scellement dans le terrain (figure 12).

Ces pieux permettent de régler des problèmes particuliers de fondation, mais on leur reproche souvent les risques de corrosion de l'acier.

À l'origine, ce type de pieu, dit *pieu MV*, découle de l'application du brevet Muller.

2.4.2 Micropieux

Cette catégorie regroupe tous les pieux de petites sections qui, selon les constructeurs, sont appelés *pieux racines*, *pieux aiguilles*, etc.

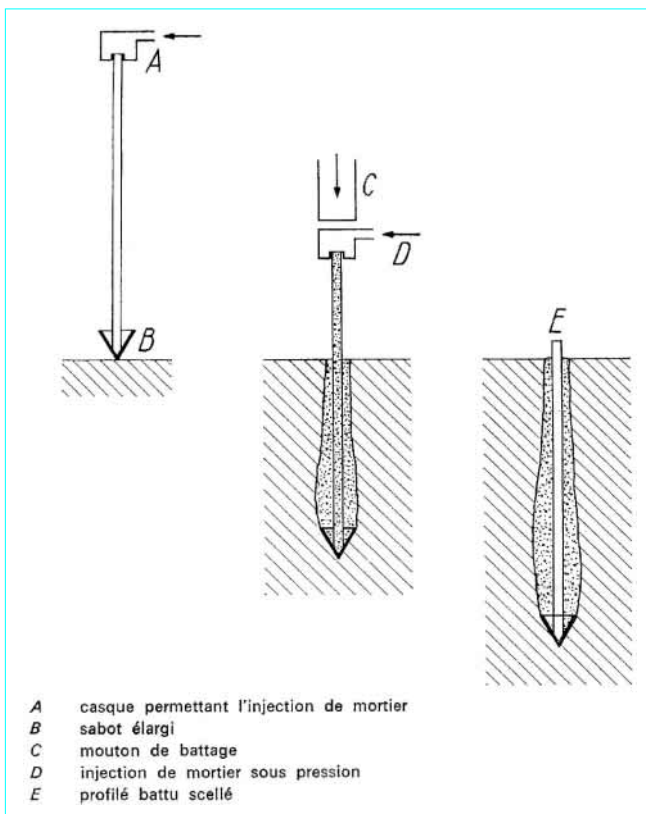


Figure 12 - Pieu traction-compression

Leur capacité unitaire oscille entre 20 et 30 t ; leur section varie de 100 à 200 mm de diamètre. Ils sont constitués par des profilés métalliques épais (rails, poutrelles, tubes épais, faisceaux de ronds crénelés, etc.) scellés par injection dans un trou de forage.

Ils nécessitent, pour leur mise en œuvre, des moyens relativement légers, ce qui permet des interventions dans des conditions d'accès difficiles (reprise en sous-œuvre, consolidation de fondation).

Si pour le forage on a recours aux procédés habituels, une des particularités de ces pieux est le soin à apporter au scellement. Il importe de procéder par injection contrôlée en fonction des différentes couches traversées ; on utilise à cet effet un tube à manchette (article *Renforcement des sols par inclusions* [C 245]).

Il est à noter que ces pieux ont permis de sauvegarder des monuments historiques en péril ou d'éviter la dégradation ou la ruine d'ouvrages dont les fondations n'étaient pas satisfaisantes.

2.4.3 Pieux vibro-flottés

Leur principe réside dans l'application du procédé John Keller (vers 1950), qui consiste à créer un puits par descente dans le sol d'un vibreur très puissant. Le vide ainsi réalisé est rempli progressivement d'un matériau d'apport convenablement choisi (sable, gravier) dont la compacité est augmentée par l'action du vibreur.

Les effets obtenus sont fonction des sols à traiter. La mesure de l'énergie développée et de la quantité de matériaux d'apport permet de fixer la capacité de ces pieux.

Cette technique s'apparente aux techniques de consolidation de sol, car l'effet du vibreur se traduit également par une amélioration des performances du sol en place (article *Compressibilité. Consolidation. Tassement* [C 214]).

2.4.4 Pieux de sable

L'exécution de ce type de pieu est très voisine de celle développée au paragraphe 2.3.1.3, le béton étant remplacé par du sable ou tout autre matériau drainant.

La gaine métallique est équipée à la base d'un sabot destiné à rester dans le sol pendant le relevage et le remplissage de sable.

On réalise ainsi un drain vertical, qui contribue à mettre en liaison les différents niveaux aquifères et rétenteurs d'eau interstitielle avec la couche drainante, ce qui accélère l'évacuation de l'eau et le phénomène de consolidation.

Ces pieux ne sont pas porteurs ; ils contribuent uniquement à améliorer les performances du terrain et à réduire la durée des terrassements.

Ils sont souvent utilisés pour améliorer des plates-formes d'autoroute, des échangeurs, etc.

2.4.5 Pieux à vis en béton

Ce genre de pieux (figure 13) évite le battage, lorsque ce dernier n'est pas possible. C'est le cas de terrains incompressibles ou de fondations d'ouvrages à proximité de constructions fragiles.

Ils ont l'avantage de travailler à l'arrachement, car ils bénéficient de l'amarrage dans le sol de la partie vissée ; on les utilise de ce fait pour fonder des ouvrages (radiers, semelles, massifs, etc.) sollicités vers le haut.

Le coulage de ces pieux, dont le fût est généralement de section octogonale (*pieu Grimaud*), nécessite des coffrages spéciaux, notamment pour la pointe (qui se termine par un sabot en fonte ou acier constituant l'amorce des filets).

On peut améliorer leur pénétration par injection d'eau à l'aide d'un tube placé dans l'axe du pieu lors du coulage.

2.4.6 Pieux vérinés

Ces pieux sont réservés aux reprises en sous-œuvre. Ils sont réalisés par enfoncements successifs d'éléments de hauteur réduite (0,50 à 1 m), à l'aide d'un vérin vertical prenant appui sur l'ouvrage à consolider (figure 14).

Ces éléments sont emboîtés ou liaisonnés par frette, et peuvent comporter un évidement intérieur permettant de contrôler la continuité du pieu (**pieu Méga**) qui est rempli en fin de fonçage. On équipe quelquefois le premier élément d'un sabot pour faciliter la pénétration.

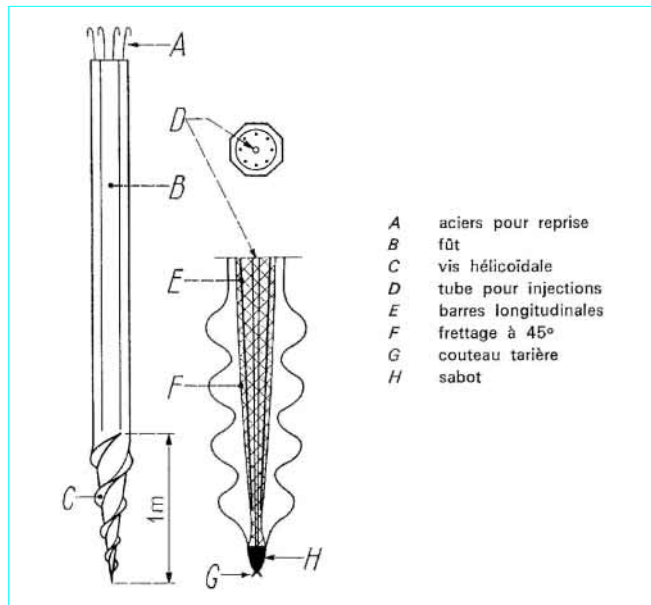


Figure 13 - Pieu à vis en béton

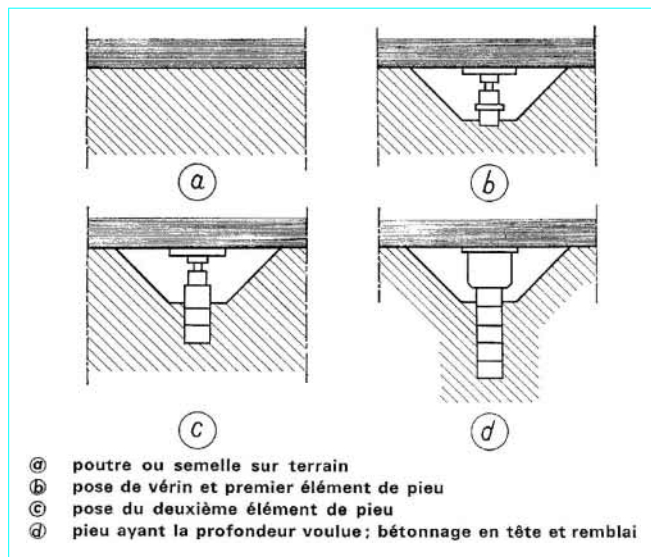


Figure 14 - Pieu vériné

3. Conditions d'emploi des pieux

3.1 Choix d'un type de pieu

Il résulte de données et critères :

— techniques :

- nature de l'ouvrage, type et importance des charges,
- longueur possible des pieux,
- nature du sol,
- présence d'eau, agressivité particulière,
- causes de détérioration,
- possibilité de mise en œuvre et environnement,
- matériaux disponibles,
- délais d'exécution souhaités ;

— économiques :

- ressources locales et matières premières (bois, acier, ciment),
- possibilités d'approvisionnements, accès, transport,
- ressources en main-d'œuvre, coût,
- matériel disponible,
- comparaison des coûts des différents types techniquement satisfaisants,
- coût de l'entretien éventuel et des conséquences sur les ouvrages voisins,
- crédits disponibles.

Les avantages essentiels des différents types de pieux sont résumés au tableau 5.

3.2 Investigations préalables

Il est essentiel d'avoir une connaissance la plus complète possible du sous-sol. Avant tous travaux, il est recommandé de procéder à une reconnaissance du sol, les renseignements contenus dans les cartes géologiques étant insuffisants (articles *Géophysique appliquée au génie civil* [C 224], *Diagraphies et géophysique de forage* [C 225] et *Propriétés mécaniques des sols déterminées en place* [C 220]).

Cette reconnaissance donne une indication sur les possibilités de battage, sur la nature du matériel à prévoir pour le forage, sur la longueur possible des pieux, et contribue à déterminer leur section.

Pour les pieux métalliques, il est utile de connaître la qualité de l'eau, son pH, et de tenir compte de l'influence de l'eau de mer et de l'agressivité éventuelle des sols.

La proximité de constructions, les ouvrages en site urbain, les difficultés d'accès ou l'insuffisance de surfaces disponibles pour la préfabrication écartent le plus souvent les solutions de pieux préfabriqués.

3.3 Calcul des pieux

L'étude des fondations ne peut être abordée que lorsque la descente des charges au niveau des têtes de pieux a été établie.

Les considérations de sol, de site, de possibilités d'exécution conduisent à plusieurs types de pieux. La concentration des charges, l'obligation de maintenir entre chaque pieu un écartement au moins égal à 2,5 fois leur diamètre conduisent, suivant les types de pieux choisis, à plusieurs solutions qui seront départagées par l'étude économique.

Tableau 5 – Caractéristiques générales et critères d'utilisation des principaux types de pieux				
Type de pieu	Charge unitaire acceptable (t)	Avantages	Inconvénients	Principales utilisations
Pieu en bois	10 à 35	Prix de revient faible Masse unitaire peu élevée Commodité de mise en œuvre Souplesse aux chocs	Limité en longueur et en capacité de portance Nécessite traitement et entretien dans les parties apparentes et à alternance air-eau (appontements) Fragile au battage, ne convient pas pour les sols durs	Fondations de petits ouvrages Convient dans régions productrices de bois et isolées Fondations d'ouvrages provisoires, ouvrages d'accostage
Pieu en béton préfabriqué battu	Couramment 100 à 130 150 à 250 pour les grosses sections (500 × 500 mm)	Qualités du béton armé Bonnes performances Inaltérable	Doit être armé pour les manutentions préalables (décollage, transport, levage) Nécessite aire de préfabrication et stockage, temps de séchage Matériel important pour mise en œuvre Bruit et vibration au battage Recépage et rabouillage délicats	Fondations d'ouvrages d'art au bord de l'eau (ponts, quais, silos, etc.) Fondations hors agglomération, dans des terrains saturés, de mauvaise qualité, et où le niveau de la couche portante est connu
Pieu battu moulé en place	Couramment 60 à 120 et jusqu'à 150	S'adapte aux profondeurs Compatibles avec la qualité du sous-sol Relativement économique en petit diamètre Performances améliorées lorsque la gaine est laissée en place	Taux de travail à la compression du béton limité à 50 daN/cm ² Diamètre limité aux possibilités du battage	Fondations de bâtiments et ouvrages d'art en site terrestre
Pieu foré moulé en place	Couramment 200 à 300 1 000 pour les gros diamètres (Ø 2 000 mm)	Exécution rapide Mise en œuvre par engin moderne peu bruyant Adapté aux variations de profondeur Possibilité de reconnaître les sols traversés et la couche portante	Qualité et contrôle de la mise en œuvre et des performances du béton Taux limité à 50 daN/cm ²	Fondations importantes (complexes sidérurgiques, centrales, grands ouvrages en site terrestre)
Pieu métallique plein	150 à 200	Peut supporter des efforts de flexion et traction Rabouillage facile Possibilité d'intervention rapide Utilisation immédiate Adapté aux variations de profondeur de fiche Possibilité de pénétration en terrain dur Peut atteindre de grandes profondeurs (40 à 50 m et plus)	Vulnérable à la corrosion Coût élevé	Fondations d'ouvrages subissant des efforts horizontaux
Pieu mixte (tube battu, vidé et rempli de béton)	300 à 400 pour des diamètres Ø 1 500 mm (charge maximale s'il est admis de faire participer l'acier)	S'adapte aux profondeurs nécessaires Section du béton constante, qualité plus soignée	S'il y a risque de corrosion, l'acier ne participe pas Difficultés de fonçage en terrain dur ou avec obstacles	Fondations en sites saturés d'eau, en sites maritimes Fondations d'ouvrages importants (quais, ponts, etc.)

En fonction de la charge portante attendue pour un pieu, on pourra en déterminer les caractéristiques, suivant :

- des méthodes de calcul statiques (§ 3.3.1), qui découlent de la mécanique des sols et qui prennent en considération les différents paramètres (γ , φ , C , etc.) ;
- des méthodes de calcul dynamiques (§ 3.3.2), applicables aux pieux battus, et qui prennent en compte la masse du mouton, la hauteur de chute, les masses du pieu et du casque, et l'enfoncement par coup ;
- l'interprétation des résultats de pénétromètres, SPT ou pressiomètres ;
- les résultats d'essais directs (article *Propriétés mécaniques des sols déterminées en place* [C 220]).

3.3.1 Méthode statique

Méthode déduite des formules de Caquot et Kérisel : la charge totale de rupture est la somme de deux termes :

$$Q = Q_f + Q_p$$

avec Q_f terme de frottement, c'est-à-dire part de la charge totale de rupture transmise au terrain le long du fût du pieu,

Q_p terme de pointe, c'est-à-dire part de la charge totale de rupture transmise à la section de la base du pieu [1].

La charge admissible Q_a se déduit de la charge Q par application d'un coefficient de sécurité k compris entre 2 et 3 :

$$Q_a = \frac{1}{k} Q$$

Nous ne pouvons ici analyser tous les éléments qui entrent dans le calcul de la force portante des pieux ; nous ne donnerons que les formules qui, suivant les cas les plus courants de sols, permettent de calculer la charge de rupture en fonction des données (A , B , D , P) indiquées sur la figure 15.

■ Sol à frottement interne

$$Q = PD \left(\frac{1}{2} \gamma' S_3 D + C' S_5 \right) + A (CN_c + \gamma' DN_q)$$

- avec
- A section du pieu,
 - B largeur du pieu,
 - D profondeur du pieu,
 - D_f fiche du pieu ($D = D_f$ pour un sol homogène),
 - P périmètre du pieu,
 - γ' poids spécifique du terrain déjaugé,
 - S_3 et S_5 coefficients de calcul du frottement latéral (figure 16a), qui tiennent compte de l'obliquité α de la poussée du sol ;
 S_3 est calculé pour $\alpha = -\varphi'$, soit $S_{3,1}$
 et pour $\alpha = -\frac{2}{3}\varphi'$, soit $S_{3,2}$
 $S_{3,1}$ est utilisé pour les ouvrages provisoires, $S_{3,2}$ dans tous les autres cas,
 S_5 est un coefficient sans dimension, fonction de φ' ,
 - φ' angle de frottement ou cisaillement interne,
 - C' cohésion,
 - γ', C', φ' sont les caractéristiques du sol au-dessus de la pointe du pieu,
 - γ, C, φ sont les caractéristiques du sol au niveau de la pointe et au-dessous,

- N_q facteur de force portante, fonction de D_f/B et de φ (figure 16b),
- N_c facteur de force portante (figure 16a).
 D'après Caquot et Kérisel : $N_c = (N_{qmax} - 1) \cotg \varphi$

■ Sol purement cohérent

$$Q = PD \left(C' \frac{100 + C'^2}{100 + 7C'^2} \right) + A (9C + \gamma' D)$$

Ces formules permettent d'évaluer la valeur théorique de la charge de rupture d'un pieu isolé dans un sol homogène dont on connaît les caractéristiques.

Dans leur application à l'étude de l'ensemble d'une fondation, il y a lieu d'examiner :

- l'effet des groupes de pieux et de leur action réciproque ;
- les tassements éventuels, les risques de résistance insuffisante des couches profondes ;
- le tassement ultérieur des terrains latéraux qui risquent de surcharger le pieu par frottement négatif et de ce fait d'en diminuer la portance ;
- la décompression latérale éventuelle des terrains.

L'évaluation de toutes ces influences ne peut être développée ici ; elle relève de méthodes empiriques, de l'expérience et de l'art du constructeur.

3.3.2 Méthode dynamique

La chute du mouton produit, d'une part, une somme de travaux inutiles :

- l'effet de choc ;
 - la déformation élastique du pieu ;
 - la compression élastique du terrain ;
- d'autre part, un travail utile :
- l'enfoncement de l'ensemble pieu, casque, mouton, d'une valeur e qui est le refus.

On détermine la force portante en écrivant que le travail du mouton est égal au produit de cette force, diminuée du poids du pieu, du casque et du mouton, par l'enfoncement e , moins la somme des travaux inutiles énumérés précédemment.

Ce principe conduit à différentes formules que nous récapitulons ci-après, chacune comportant quelques particularités (notamment en ce qui concerne le coefficient de sécurité σ et les éléments pris en compte).

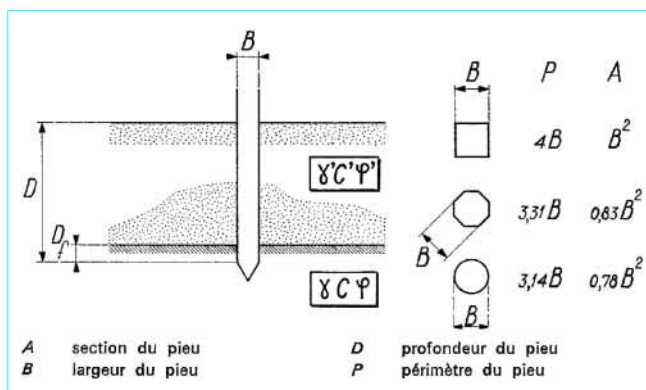
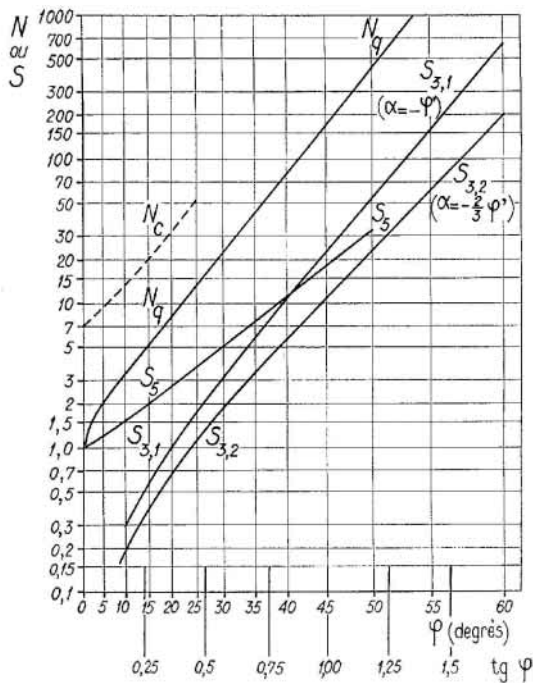
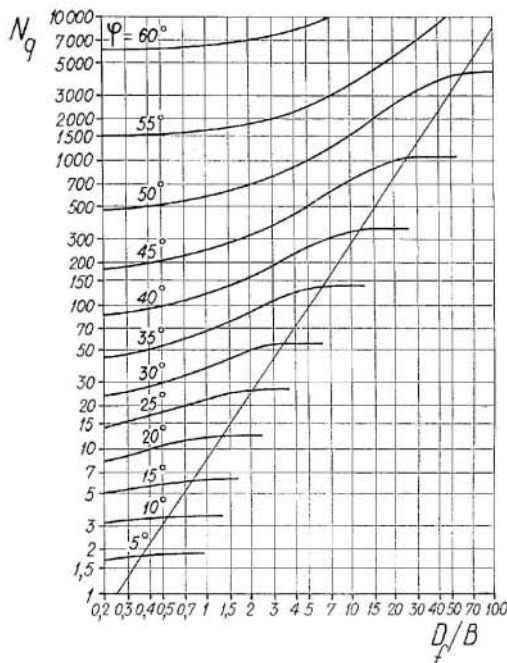


Figure 15 – Force portante des pieux : notations



(a) N et S en fonction de phi ou tg phi



(b) Nq en fonction de Df/B

B largeur du pieu
 Df profondeur du pieu
 Nc et Nq facteurs de force portante
 S3,1, S3,2 et S5 coefficients de calcul du frottement latéral
 alpha obliquité de la poussée du sol
 phi et phi' angles de frottement interne

3.3.2.1 Formules applicables au battage avec mouton à simple effet

■ **Formule des Hollandais** : c'est la plus ancienne ; elle tient compte habituellement d'un coefficient de sécurité de 6 (porté éventuellement à 10 pour le battage au mouton en chute libre) ; elle suppose que la totalité de l'énergie due à la chute du mouton est utilisée pour enfoncer le pieu ; la résistance du pieu est donnée par :

$$R = \frac{M^2 h}{6e(M + P)}$$

avec M poids du mouton,
 P poids du pieu,
 h hauteur de chute,
 e enfoncement moyen par coup de mouton, mesuré sur une volée de 10 ou 20 coups.

En général, le poids du mouton est supérieur ou voisin du poids du pieu. Si M est inférieur à P (P/2 < M < P), on affecte le résultat d'un coefficient réducteur k égal à 1 - 4 (1 - M/P)³ (figure 17).

Pour des refus faibles (e < 2 mm), la charge admissible augmente anormalement ; il est conseillé d'utiliser alors de préférence de la formule de Redtenbacher.

■ **Formule de Redtenbacher** : elle tient compte de l'élasticité du pieu :

$$F = \frac{SE}{\ell} \left(-e + \sqrt{e^2 + \frac{2M^2 h \ell}{M + P ES}} \right)$$

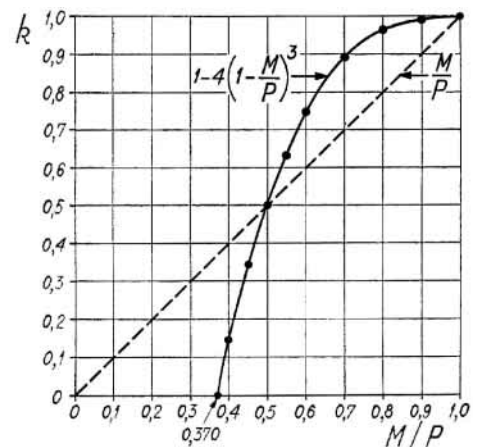
avec l longueur du pieu,
 S section rendue homogène (S = S_{béton} + 15 S_{acier}),
 E module de déformation longitudinale.

Cette formule est applicable avec un coefficient de sécurité de 3 à 4. La résistance du pieu est alors :

$$R = F/3$$

Si le refus est nul avec un coefficient de sécurité égal à 3, on a :

$$R = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{2M^2 h ES}{M + P \ell}}$$



k coefficient réducteur
 M poids du mouton
 P poids du pieu

Figure 17 - Variation du coefficient réducteur 1 - 4 (1 - M/P)³

Figure 16 - Facteurs de force portante

■ **Formule de Hiley** : pour un pieu vertical et pour $M \geq P$:

$$R = \frac{M^2(h - h_0)}{4e'(M + P)}$$

avec e' enfoncement du dernier coup de mouton,
 h hauteur de chute libre du mouton,
 h_0 hauteur de chute libre du mouton pour laquelle il ne produirait pas d'enfoncement du pieu ; h_0 est déterminée en supposant que l'enfoncement est une fonction linéaire de la hauteur de chute.

Le coefficient de sécurité est égal à 4.

En mesurant les enfoncements moyens e_1, e_2 , pour des hauteurs de chute h_1, h_2 , on peut constater que leur représentation graphique est approximativement une droite dont l'intersection avec l'axe de h est la valeur h_0 .

■ **Formule de Crandall et Sprenger** :

$$R = \frac{k M^2 h}{\sigma(e + e_1)(M + P)}$$

M, P et h ont les mêmes significations que précédemment ; σ est le coefficient de sécurité.

k est le rapport du refus e , observé dans des conditions habituelles de battage, à celui constaté au cours d'essai de battage avec mouton tombant en chute libre sur la tête du pieu dépourvu de casque.

e_1 est un facteur de correction, pris égal à la moitié du raccourcissement élastique du pieu en fin de battage, supposé mesuré comme la différence entre l'enfoncement maximal sous un coup de mouton et l'enfoncement subsistant après la détente élastique du pieu.

Les mesures de e_1 et de k sont délicates et causes de perte de temps au battage.

3.3.2.2 Formules applicables au battage avec mouton Diesel

L'énergie E provoquant l'enfoncement du pieu est la somme de E_1 , provenant de la chute du mouton, et de E_2 énergie qui résulte de l'explosion produite en fin de chute :

$$E = E_1 + E_2$$

E_1 étant corrigé, dans le cas des pieux inclinés d'un angle α , pour tenir compte des frottements f :

$$E = E_1 (\cos \alpha - f \sin \alpha) + E_2$$

La charge admissible est donnée par la formule générale :

$$R = \frac{1\,000 EM}{\sigma(e + \Sigma \ell)(M + P)}$$

avec e (mm) refus,
 ℓ (m) longueur du pieu,
 Σ coefficient caractérisant l'élasticité du pieu et du terrain ; on prend généralement : $\Sigma = 0,3$ pour les pieux en béton, $\Sigma = 0,6$ pour les pieux en bois,
 σ coefficient de sécurité, généralement fixé à 5/3.

Le principal constructeur de moutons Diesel, Delmag, donne une formule pour le calcul de la force portante notée ici W .

La force portante W est donnée par :

$$W = \frac{ER}{(CL + s)(R + Q)} k$$

avec $E = Rh$ (J) énergie de frappe totale,
 h (m) hauteur de chute : $h = 4\,415/n^2$ (n nombre de coups de mouton par minute),
 R (N) poids de la masse frappante, donnée par le constructeur,
 C coefficient arbitraire d'élasticité du pieu et du terrain traversé,
 L (m) longueur totale du pieu,
 s (mm) refus plastique par coup (moyenne arithmétique de l'enfoncement réel pendant la dernière volée de dix coups de mouton),
 Q (N) poids total des masses mises en mouvement par le mouton (masse du pieu, du casque et de l'enclume),
 k coefficient de sécurité, se situant couramment entre 0,4 et 0,6.

Le coefficient d'élasticité C , avec les moutons Diesel Delmag courants *D 8-22, D 16-32, D 25-32/33, D 30-32/33, D 36-23, D 46-23, D 62-22, D 80-23, D 100-13*, a pour valeur :

$C = 0,3$ pour les pieux métalliques et en béton armé,
 $C = 0,6$ pour les pieux en bois.

La masse de l'enclume, entrant dans la valeur de Q pour les moutons Diesel Delmag, est la suivante :

<i>D 8-22</i>	200 kg
<i>D 16-32</i>	345 kg
<i>D 25-32/33</i>	560 kg
<i>D 30-32/33</i>	560 kg
<i>D 36-23</i>	910 kg
<i>D 46-23</i>	910 kg
<i>D 62-22</i>	1 340 kg

Le tableau 6 fait apparaître, pour les moutons habituellement utilisés, les valeurs de R, E, E_1, E_2 :

E est l'énergie totale provoquant l'enfoncement du pieu ;
 E_1 est l'énergie provenant de la chute de la masse frappante ;
 E_2 est l'énergie résultant de l'explosion qui se produit à la fin de la chute.

— Si le pieu est vertical :

$$E = E_1 + E_2$$

— Si le pieu est incliné :

$$E = E_1 (\cos \alpha - f \sin \alpha) + E_2$$

avec α angle de l'axe du pieu avec la verticale,
 f coefficient de frottement du mouton égal à 0,2 en général.

L'application de toutes ces données aux formules qui précèdent permet d'établir des abaques donnant la force portante du pieu en acier, en béton armé ou en bois, en fonction du refus mesuré pour un mouton donné, pour des valeurs différentes de Q .

À titre d'exemple, la figure 18 donne les courbes définies pour des pieux en béton et acier battus au mouton Delmag *D 16-32*.

s : enfoncement par coup (valeur moyenne de la dernière volée de dix coups)
 W : force portante (sans facteur de sécurité)

Les courbes sont valables pour des pieux en béton et acier de 10 m de longueur avec les masses indiquées sur les courbes et $k = 1$.

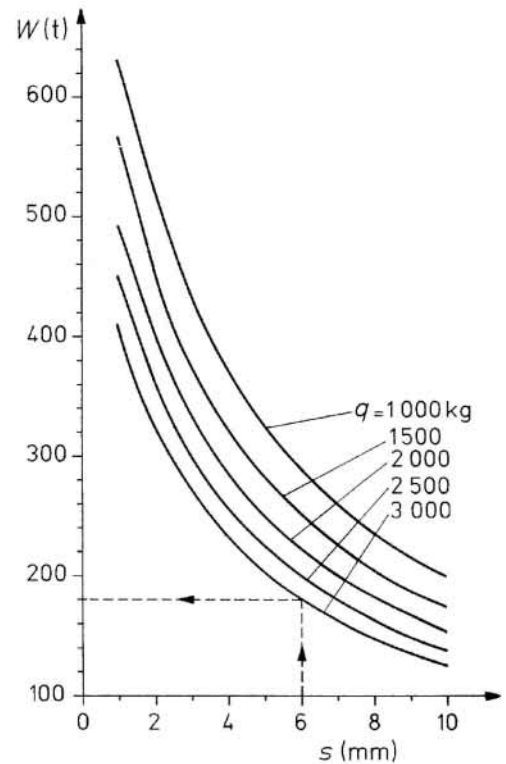
On obtient la valeur de W pour des pieux plus courts ou plus longs indiqués sur le tableau, mais ayant la même masse, en lisant W sur la courbe correspondant à la masse du pieu et à l'enfoncement obtenu, et en multipliant la valeur de W obtenue par le coefficient du tableau suivant correspondant à l'enfoncement par coup.

Exemple :

longueur du pieu à battre $L = 12$ m
 masse du pieu $q = 3000$ kg
 enfoncement par coup $s = 6$ mm

La courbe indique, pour un pieu de 10 m de longueur et d'une masse de 3000 kg, avec un enfoncement de 6 mm par coup, une force portante W de 180 t. Suivant le tableau, le coefficient correspondant à un pieu de 12 m de longueur avec un enfoncement de 6 mm par coup est 0,94; ainsi, la force portante est:

$$W = 180 \times 0,94 \approx 170 \text{ t}$$



s (mm)	Longueur du pieu L (m)										
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1,60	1,43	1,29	1,18	1,08	1	0,93	0,87	0,82	0,77	0,73
2	1,43	1,32	1,22	1,14	1,06	1	0,94	0,89	0,85	0,81	0,77
3	1,33	1,25	1,18	1,11	1,05	1	0,95	0,91	0,87	0,83	0,80
4	1,27	1,21	1,15	1,09	1,04	1	0,96	0,92	0,89	0,85	0,82
5	1,23	1,18	1,13	1,08	1,04	1	0,96	0,93	0,90	0,87	0,84
6	1,20	1,15	1,11	1,07	1,03	1	0,97	0,94	0,91	0,88	0,86
7	1,19	1,14	1,10	1,06	1,03	1	0,97	0,94	0,92	0,89	0,87
8	1,16	1,12	1,09	1,06	1,03	1	0,97	0,95	0,93	0,90	0,88
9	1,14	1,11	1,08	1,05	1,03	1	0,98	0,95	0,93	0,91	0,89
10	1,13	1,10	1,07	1,05	1,02	1	0,98	0,96	0,94	0,92	0,90

Figure 18 - Force portante pour pieux en béton et acier battus avec les moutons Diesel Delmag D 16-32

Tableau 6 - Caractéristiques de battage aux moutons Diesel Delmag

Type mouton	D 8	D 16	D 25	D 30	D 36	D 46	D 62
R (t)	0,8	1,6	2,5	3	3,6	4,6	6,2
E_1 (kJ)	13,9	31	45,8	55	66	84,4	127,2
E_2 (kJ)	10,5	23,4	34,7	41,6	49,9	63,70	96
E_{maxi} (kJ)	24,4	54,4	80,5	96,6	115,9	148,1	223,2
E_{mini} (en % de E_{maxi})	53 %	48 %	50 %	50 %	48 %	48 %	48 %

Des moutons de puissance supérieure à ceux donnés dans le tableau 6 (*D 80* et *D 100*) sont également fabriqués et permettent la mise en œuvre de tubes de grande capacité, de masse unitaire de l'ordre de plusieurs dizaines de tonnes, notamment en off-shore. Le calcul de leur capacité est fondé sur les équations d'ondes non traitées dans le présent article.

3.3.3 Interprétation des résultats du pénétromètre ou du pressiomètre

Cette méthode consiste à établir deux corrélations, l'une entre les résultats d'un essai au pénétromètre et les caractéristiques du sol, l'autre entre les caractéristiques du sol et le taux de travail admissible.

L'emploi de pénétromètre le plus développé est le SPT (Standard Penetration Test ; article *Propriétés mécaniques des sols déterminées en place* [C 220]). L'application de cette méthode n'est possible que pour les terrains cohérents homogènes.

En pratique, on peut considérer que, si *N* est le nombre de coups du SPT, la résistance à la compression simple (en kN/m²) est $\sigma_3 = 13,3 N$, et le taux de travail admissible au frottement latéral est $\tau_a = 2 N$.

D'où la formule suivante, si *N* est constant sur toute la profondeur *D*, en reprenant les notations du paragraphe 3.3.1 et avec *L* longueur de la section du pieu :

$$Q = (2N)PD + A \left[1,33N \left(1 + 0,3 \frac{B}{L} \right) \right]$$

Dans le cas d'un pieu carré *B = L* d'où *B/L = 1*

Ces formules gardent un caractère approximatif et doivent être utilisées avec précaution (les indications du SPT peuvent être différentes d'un point à un autre).

On peut également interpréter les résultats d'autres types de pénétromètres ; nous ne pouvons tous les citer ici, leurs applications étant peu fréquentes.

Par contre, nous devons mentionner l'utilisation des résultats des essais pressiométriques largement développés par L. Ménard et qui ont conduit le Service d'études techniques des routes et autoroutes (SETRA) à établir des abaques permettant une utilisation courante ; en France, cela fait l'objet des recommandations du FOND 72, établi par le Laboratoire central des ponts et chaussées et par le SETRA.

3.3.4 Interprétation des résultats d'essais directs

Nous devons distinguer deux formes d'applications :

— d'une part, l'interprétation d'essais faits préalablement sur un pieu de type et caractéristiques donnés, placé au voisinage des ouvrages projetés, et qui ont pour but de déterminer la force portante maximale mesurée à la rupture ;

— d'autre part, l'interprétation d'essais effectués sur un ou plusieurs pieux construits pour l'ouvrage, et qui ont pour but d'effectuer un contrôle et une vérification de leur capacité ; ces derniers essais consistent à charger les pieux pour une valeur égale à 1,5, 2 ou 2,5 fois la charge de service, mais sans jamais atteindre la rupture.

Dans les deux cas, on procède par effet de chargement et déchargement successifs, et l'on mesure les enfoncements correspondants. On en déduit la charge maximale acceptable en service ; la charge admissible sera, d'après le bureau Veritas, *la plus petite des trois charges* ci-après :

- la moitié de la charge donnant 20 mm d'affaissement résiduel ;
- les deux tiers de la charge donnant 10 mm d'affaissement résiduel ;
- la charge donnant un affaissement résiduel de 3 mm.

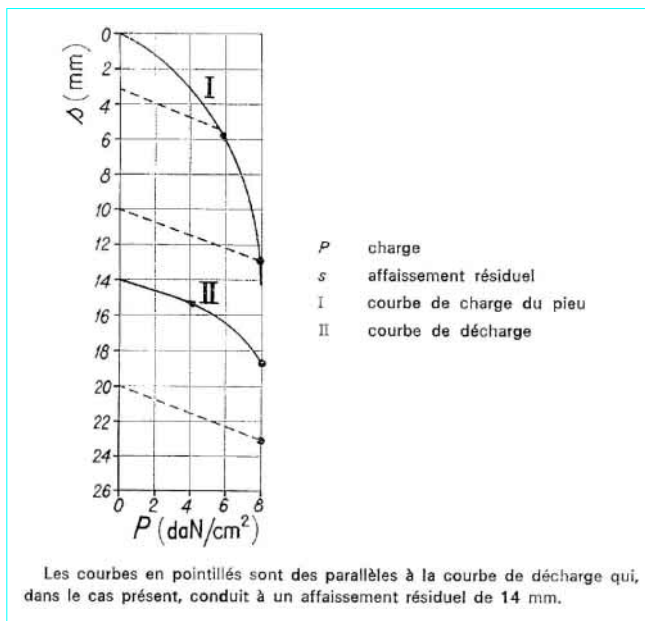


Figure 19 – Détermination de la charge admissible

Dans le cas de la figure 19, on aurait les contraintes suivantes :

- pour 20 mm, $P = 8/2 = 4$ daN/cm² ;
- pour 10 mm, $P = 2/3 \times 7,9 = 5,2$ daN/cm² ;
- pour 3 mm, $P = 5,9$ daN/cm².

On peut accepter une contrainte de 4 daN/cm², qui correspond à un affaissement de 3 mm.

4. Mise en œuvre des pieux

Les techniques utilisées sont très différentes suivant les types de pieux.

Les pieux préfabriqués battus nécessitent des engins de manutention, de bardage, de battage, de vibration et de lançage de même nature que ceux employés pour le fonçage des palplanches.

En revanche, la mise en œuvre des pieux forés requiert à la fois des matériels spéciaux pour l'exécution du forage et des équipements bien adaptés pour la mise en place du béton.

4.1 Techniques de battage

4.1.1 Sonnettes et mâts

Le battage pose deux problèmes très distincts : d'une part, la tenue et le guidage du pieu ; d'autre part, la mise en œuvre d'une énergie de battage.

Les **sonnettes** (figure 20a et b) sont, suivant les sites d'utilisation, terrestres ou flottantes, et généralement inclinables. Elles constituent les engins les plus classiques assurant à la fois le guidage des pieux et du mouton.

Un procédé plus moderne et plus léger consiste à utiliser des **mâts de battage**, généralement fixés sur grues à chenilles souvent inclinables dans toutes les directions (figure 20c).

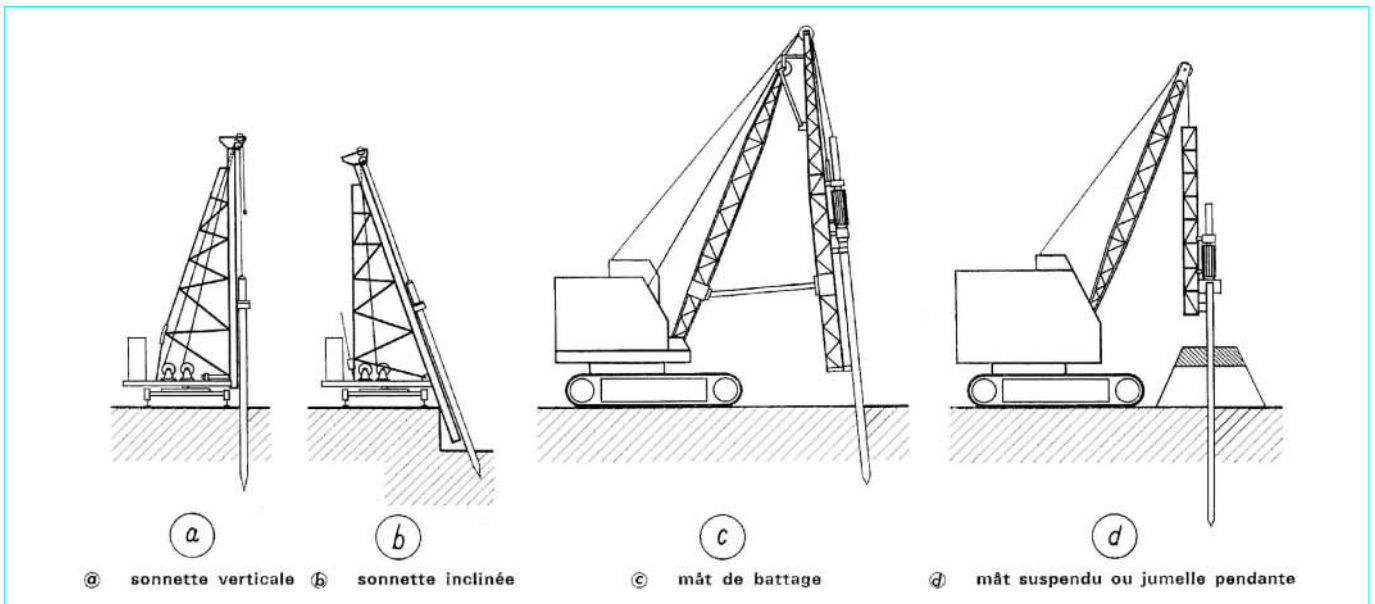


Figure 20 - Sonnettes et mâts

Si les pieux sont maintenus, durant leur enfoncement, par des gabarits ou des échafaudages, il est possible d'employer, pour le guidage du mouton uniquement, des équipements très légers et très mobiles qui s'appuient sur le pieu à battre ; ce sont les **mâts suspendus** ou **jumelles pendantes** (figure 20d).

4.1.2 Engins de battage

L'énergie de battage peut être produite par des *moutons* ou des *trépideurs*.

4.1.2.1 Moutons à chute libre

Les moutons à chute libre, dénommés également par les batteurs *moutons secs*, agissent par l'effet de leur masse tombant en chute libre.

Le relevage est assuré par un câble muni d'un crochet à déclié libérant la masse à une hauteur donnée, ou par l'action d'un treuil à débrayage et embrayage rapides.

4.1.2.2 Moutons à simple effet

Les moutons à simple effet (figure 21) sont constitués par un cylindre et un piston, la masse frappante pouvant, suivant les types, être l'un ou l'autre de ces organes.

La chute de cette masse est libre, mais sa remontée nécessite l'action de vapeur ou d'air comprimé. Les masses de ces moutons varient de 0,5 à 20 t, rarement plus, et les hauteurs de chute de 0,50 à 1,20 m. Les cadences habituelles de frappe sont de l'ordre de 50 à 60 coups par minute.

Plusieurs types de moutons peuvent convenir pour un même travail ; cependant, certaines règles sont couramment appliquées :

- le poids du mouton doit en principe être au moins égal à celui du pieu ($M \geq P$) ; pour les pieux très lourds, on admet les valeurs $0,5 P < M < P$; les formules de battage (§ 3.3.2.1) sont alors affectées d'un coefficient réducteur $1 - 4 (1 - M/P)^3$;
- il est toujours préférable d'employer un mouton lourd tombant d'une faible hauteur que l'inverse, cela évite une perte d'énergie dans le rebondissement ;

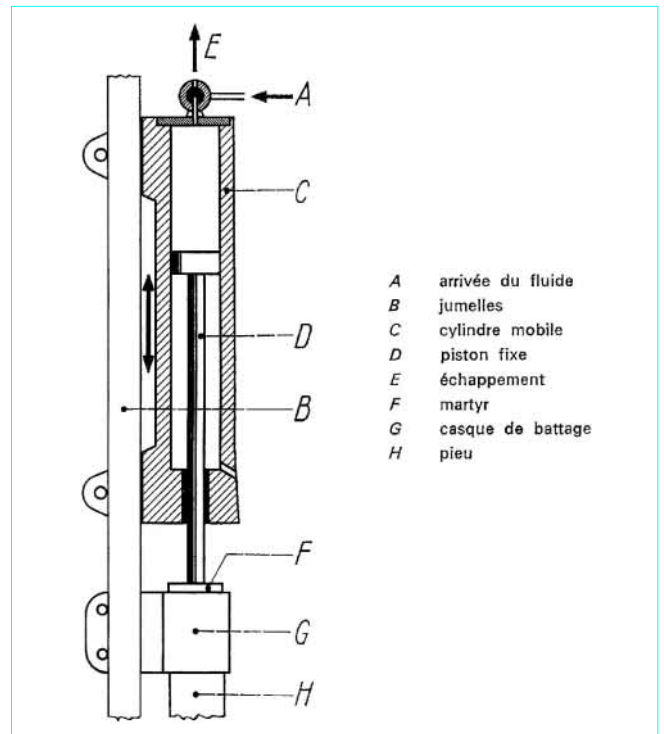


Figure 21 - Mouton à simple effet à cylindre mobile

— dans les terrains sablonneux, il y a intérêt à utiliser un marteau à cadence rapide, de façon à maintenir le sol en vibration ; le perfectionnement des matériels va dans cette direction et conduit aux *marteaux trépideurs* (§ 4.1.2.3) et aux *vibrateurs* (§ 4.2).

4.1.2.3 Moutons à double effet ou marteaux trépidateurs

Ces engins (figure 22) comportent également un cylindre et un piston ; ce dernier, constituant la masse frappante, est actionné par la vapeur, l'air comprimé ou un fluide en pression.

La cadence de frappe est très élevée : 100 à 300 coups par minute, ce qui provoque un effet de vibration particulièrement efficace dans les sols granuleux.

La masse de ces engins varie de 300 à 3 500 kg ; les plus gros peuvent développer des énergies de 30 kJ.

Ces appareils, ainsi que les vibrateurs (§ 4.2), sont particulièrement employés pour le fonçage des profilés métalliques, palplanches, poutrelles, tubes. Retournés, ils sont utilisés pour l'arrachage, une traction verticale étant exercée à l'aide d'un système de bretelles maintenant le trépidateur dans la position de battage de bas en haut.

4.1.2.4 Moutons Diesel

Les moutons Diesel sont des engins autonomes et automoteurs ; leur principe de fonctionnement est celui du moteur Diesel (figure 23).

Le piston constitue la masse frappante ; il comprime dans sa chute un volume d'air dans lequel a été injectée une petite quantité de gas-oil.

À l'effet de choc produit par la chute du piston s'ajoute l'explosion du mélange comprimé ; ainsi sont obtenues l'énergie de frappe et la remontée du piston.

Cet engin est doté d'un réservoir de gas-oil, d'une pompe à injection et d'un dispositif de graissage qui lui assure une autonomie de fonctionnement.

Les énergies de frappe des moutons Diesel varient de 1,2 à 20 kJ pour des appareils pesant de 300 à 16 000 kg. Ce sont les matériels actuellement les plus utilisés sur les chantiers de battage.

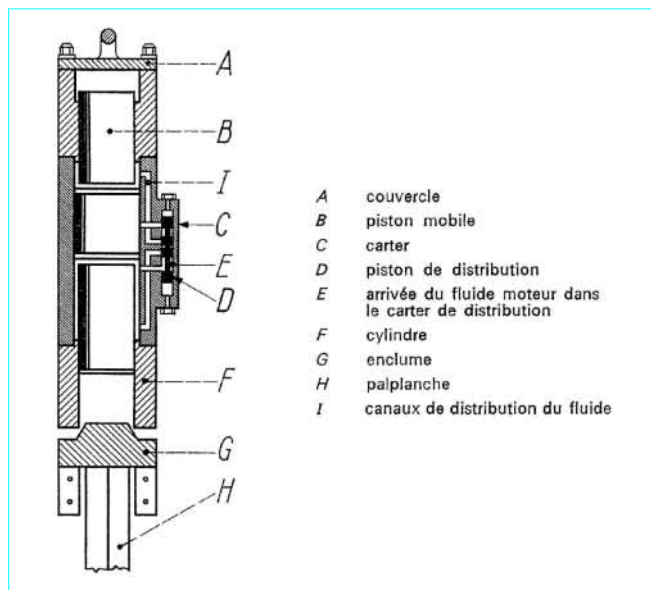


Figure 22 – Trépidateur

4.1.3 Casques, martyrs ou têtes-de-Turc

Le **casque** est un accessoire indispensable au battage ; il coiffe les pieux et évite leur dégradation. Il est construit généralement en acier moulé ; sa partie inférieure est adaptée aux pieux ou profilés à battre, et sa partie supérieure comporte un logement destiné à recevoir le martyr.

Le **martyr**, couramment appelé *tête-de-Turc* par les batteurs, est un amortisseur qui évite la détérioration du casque et qui réduit le rebondissement du mouton.

Il est constitué en bois dur (azobé) fretté ou renforcé par des câbles ; on en fabrique actuellement en résine synthétique.

4.2 Techniques de fonçage par vibration

Le principe essentiel des techniques de vibration est diminuer les frottements internes des sols non cohérents ; cela a pour effet de réduire les frottements latéraux des éléments foncés.

Les **vibrateurs** ou **vibrofonçeurs** sont des engins qui provoquent une vibration énergétique aux éléments à foncer ou à arracher, auxquels ils sont rigidement solidarisés (figure 24).

Ces appareils sont constitués par deux arbres parallèles équipés de balourds tournant en sens opposé.

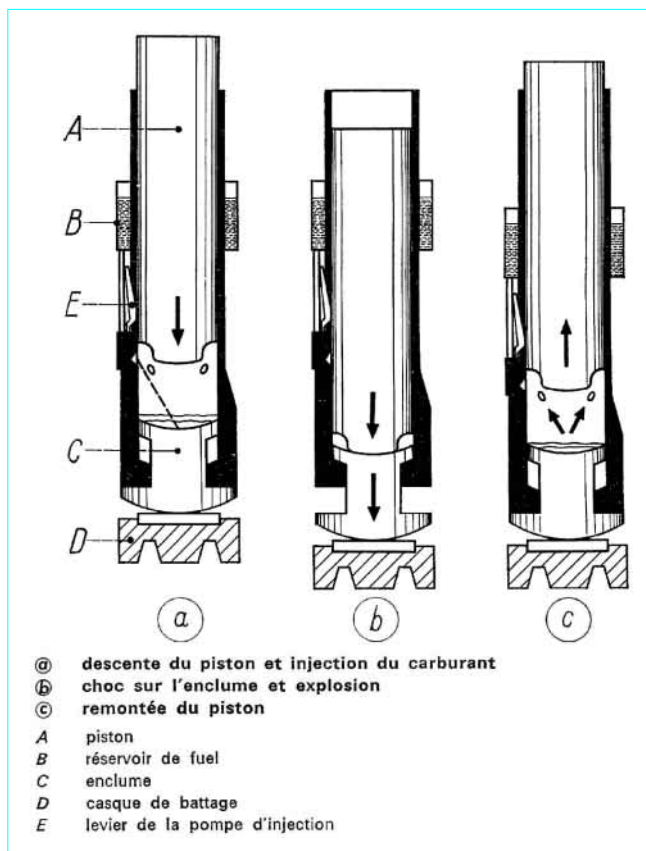


Figure 23 – Mouton Diesel

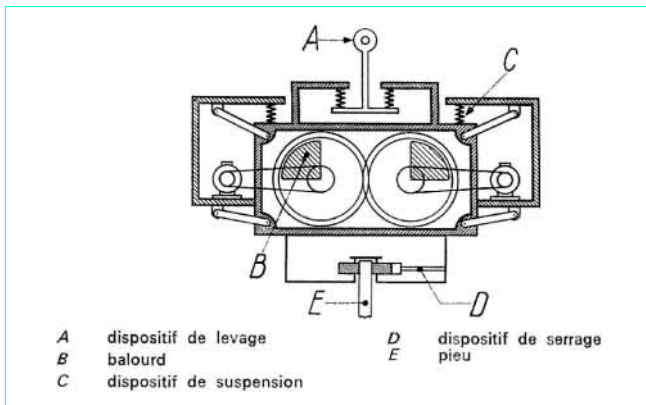


Figure 24 – Vibreur

Les vibrations sont produites par les composantes verticales des forces d'inertie centrifuge, tandis que les composantes horizontales de ces mêmes forces s'annulent.

Les vibreurs sont équipés de moteurs électriques ou hydrauliques ; la masse totale de ces appareils varie de 700 à 10 000 kg pour des puissances de 12 à 200 kW ; ces caractéristiques sont doublées lorsqu'ils sont montés en tandem, ce qui est recommandé pour le fonçage d'éléments de plus de 15 t, ayant environ 50 % de fiche dans des terrains relativement difficiles.

4.3 Techniques de lançage

Le lançage est une technique rarement employée seule. Son efficacité est fonction de la nature des terrains ; c'est dans les terrains sableux qu'elle donne les meilleurs résultats.

On utilise généralement le lançage pour faciliter l'enfoncement des pieux en cours de battage. Le procédé consiste à envoyer de l'eau sous une pression de 7 à 12 bar au droit de la pointe du pieu ou de la base de l'élément à foncer. Ce jet est obtenu à l'aide de lances fixes pouvant être installées lors de la fabrication des pieux, ou de lances mobiles que l'on déplace verticalement pour éviter le blocage des matériaux.

Le lançage doit être arrêté avant d'atteindre la cote définitive, pour que la fin du battage soit réalisée dans un sol non remanié.

4.4 Techniques de forage

On distingue les forages à la benne et les forages en rotation (§ 2.3.2).

Les outils de forage sont souvent employés à l'aide de grues sur pneus ou sur chenilles, dont les treuils et câbles sont utilisés pour actionner les soupapes, curettes, bennes et trépanes (figure 10).

Il existe également des engins construits spécialement pour le forage à la benne, par exemple les machines *Benoto*, *Galinet*, *Migal*, etc.

Pour le forage en rotation, des équipements spéciaux peuvent être montés sur les porteurs mobiles, ou adaptés sur des châssis conçus à cet effet, comme le proposent les constructeurs Wirth, Salzgitter, Calweld, Hausherr France, Spec, etc.

Les caractéristiques de ces matériels et outils, tarières pleines, bennes cylindriques à fond ouvrant (*buckets*), tarières creuses, sont contenues dans les documents fournis par les constructeurs.

Il y a lieu de citer ici la technique de **roto-percussion** qui, ces dernières années, a connu des améliorations importantes ; c'est le forage au marteau rotatif ou perforateur. À l'origine, ces engins étaient employés pour les forages de mines ; leurs performances permettent maintenant de les utiliser pour des pieux de 100 à 200 mm de diamètre, devant pénétrer dans des terrains durs sur des longueurs importantes (quelques mètres).

4.5 Problèmes d'exécution

4.5.1 Pieux préfabriqués battus

Les pieux en béton armé présentent des risques de rupture durant les opérations de décollage, de bardage et de mise en fiche. Durant le battage, les risques de rupture ou de déformation sur un obstacle ou par excès d'énergie ne sont pas exclus, l'allure de la courbe de battage, qu'il est indispensable d'établir pour chaque pieu, surtout dans les sols hétérogènes, est significative sur ce point (article *Propriétés mécaniques des sols déterminées en place* [C 220]).

Les conditions du refus sont à analyser avec soin : une lentille de terrain plus compact ou une concentration de pieux peuvent conduire, pour une zone donnée, à un faux refus, de même qu'une reprise de battage sur un pieu dont l'enfoncement a été interrompu.

Il importe d'étudier chaque cas en comparant les études de sol et les courbes de battage ; les spécialistes et les mécaniciens du sol sont les plus qualifiés pour en tirer les conclusions.

Différentes méthodes (§ 4.6.3) permettent de s'assurer de la continuité des fûts et des armatures après battage.

4.5.2 Pieux forés

Les différentes phases de l'exécution des pieux forés peuvent poser des problèmes.

En premier lieu, durant le forage, la nature des couches traversées, leur épaisseur, la présence d'eau sont les différents éléments qui doivent être observés soigneusement. Il importe d'éviter les éboulements, de maintenir la section imposée éventuellement par tubage ou par emploi de boue. L'ancrage dans le substratum, le choix des outils permettant la traversée du rocher, le nettoyage du fond de trou sont aussi des sujétions qui méritent une attention soutenue.

En second lieu, la mise en place des cages d'armatures et du béton doivent faire l'objet de soins attentifs. La qualité du béton, sa maniabilité, sa composition justifient des mesures et des contrôles en permanence.

Le procédé de bétonnage donnant les meilleurs résultats est le **tube plongeur** (figure 11). Il doit pour cela faire l'objet de précautions, tant lors de l'amorçage qu'en cours de coulage du béton.

Pendant le bétonnage, des dispositions sont à prendre pour éviter la remontée des armatures et l'effondrement des parois.

Tous ces problèmes ne peuvent être parfaitement résolus qu'au prix d'une collaboration étroite et constante entre le mécanicien du sol, le maître d'œuvre et le spécialiste d'exécution.

Les contrôles faits *a posteriori* ne devraient être que la vérification de la qualité des pieux ; lorsqu'il en est autrement, c'est-à-dire en cas de refus du pieu, les réparations qui s'imposent (reprise de pieux, injections, pieux supplémentaires) sont toujours très coûteuses. Les défauts non décelés sont souvent, pour les ouvrages terminés, cause d'accidents graves, tels que tassements excessifs ou effondrements.

4.6 Contrôle des pieux

Après exécution, plusieurs procédés de contrôle sont possibles, suivant les résultats que l'on veut obtenir.

4.6.1 Essai statique de chargement

Cet essai (§ 3.3.4) est le plus déterminant, car il fixe à la fois la capacité de portance du pieu et les performances du sol, mais nécessite des moyens importants et est relativement coûteux (figure 25).

Il est recommandé d'en exécuter au moins un dans le cas d'un ensemble de pieux.

4.6.2 Carottage

Ce contrôle justifie une intervention à l'aide de sondeuse. Il permet de vérifier à la fois la qualité du fût, du pieu, le bon contact béton-sol en pointe, éventuellement la qualité du sol sous le pieu.

Ces valeurs ne contribuant que partiellement aux performances du pieu, le contrôle doit être complété par des essais de chargement, sauf dans le cas où les qualités du sol de fondations sont parfaitement connues.

4.6.3 Contrôle non destructif

Trois méthodes sont actuellement utilisées :

- l'impédance mécanique (vibration) ;
- la méthode d'écho ;
- le carottage sonique.

Les deux premières ne nécessitent aucune prévision des essais ; en revanche, pour la troisième, il faut incorporer des tubes dans les pieux lors du bétonnage.

De même que pour le carottage, le contrôle non destructif doit être complété par d'autres essais.

Ces méthodes ont fait l'objet d'une conférence à l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics [5]. Elles ont chacune leurs avantages et leurs performances, et le choix est fonction du but recherché.

4.7 Conditions économiques

Les fondations sur pieux représentent une valeur importante du prix de revient des ouvrages. Cette valeur est fonction du type de pieux, de la nature du sous-sol ; elle est également affectée par le coût des dispositions prises au titre de la lutte contre les nuisances, bruit, pollution des nappes, évacuation des boues et des déblais, etc.

Il est difficile de faire ici une étude comparative des différentes solutions ; chaque cas est un cas particulier.

Exemple : à titre indicatif, dans les conditions économiques actuelles, le prix de la tonne portée au mètre de pieu varie de 2 à 3 F pour des profondeurs moyennes de l'ordre de 10 m. C'est-à-dire que, pour un pieu de 15 m de longueur portant 100 t, la valeur varie de 3 000 à 4 500 F.

Il est bien évident que l'incidence des installations de chantier, les conditions d'accès, les possibilités locales en matière première et en main-d'œuvre doivent chaque fois être étudiées, et qu'il n'y a pas de prix catalogue ; le type de pieu, la section, la profondeur sont également des éléments qui doivent être appréciés à leur juste valeur pour chaque cas.

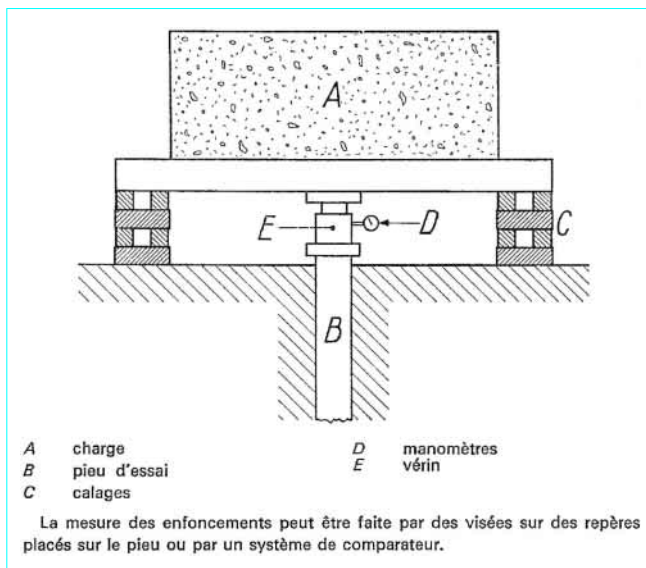


Figure 25 – Essai de chargement

Malgré toutes les investigations préalables, il est très rare qu'à la réalisation les quantités prévues au projet soient respectées, soit parce que le terrain est moins performant, soit parce que le maître d'œuvre ou l'entrepreneur recherchent une plus grande sécurité. Les dépassements de devis sont également causés par les immobilisations et les arrêts de chantier nécessités par l'analyse des problèmes imprévus posés à l'exécution, voire les investigations complémentaires.

Il est donc toujours prudent de prévoir des sommes à valoir sur les fondations, et de disposer de prix unitaires permettant toutes les adaptations en cours d'exécution.

5. Palplanches

5.1 Types de palplanches

5.1.1 Palplanches en bois

Leur emploi est quasiment abandonné. À titre rétrospectif, nous pouvons signaler qu'elles étaient constituées de madriers de chêne ou de sapin ayant couramment 0,25 à 0,35 m de largeur et 0,06 à 0,12 m d'épaisseur.

Ces palplanches comportaient souvent un système d'assemblage à rainure et grain d'orge, ou rainure et languette, pour leur permettre de rester dans le même plan vertical lors du battage. La raideur et la tenue de ces rideaux étaient assurées par un système de pieux en bois à section rectangulaire, battus préalablement tous les 4 à 5 m et reliés entre eux par des moises en bois. Les palplanches étaient ensuite mises en place à l'intérieur de ces guides horizontaux, enclenchées à la fois dans les pieux et les unes par rapport aux autres (figure 26).

Malgré les renforcements constitués par un frettage en tête et un sabot en pied, le battage restait toujours une opération délicate, et ces précautions étaient souvent insuffisantes dans les terrains durs. Comme pour les pieux en bois, les moyens de battage ne pouvaient qu'être très limités, néanmoins subsistaient des risques de déviation ou de rupture à l'enfoncement.

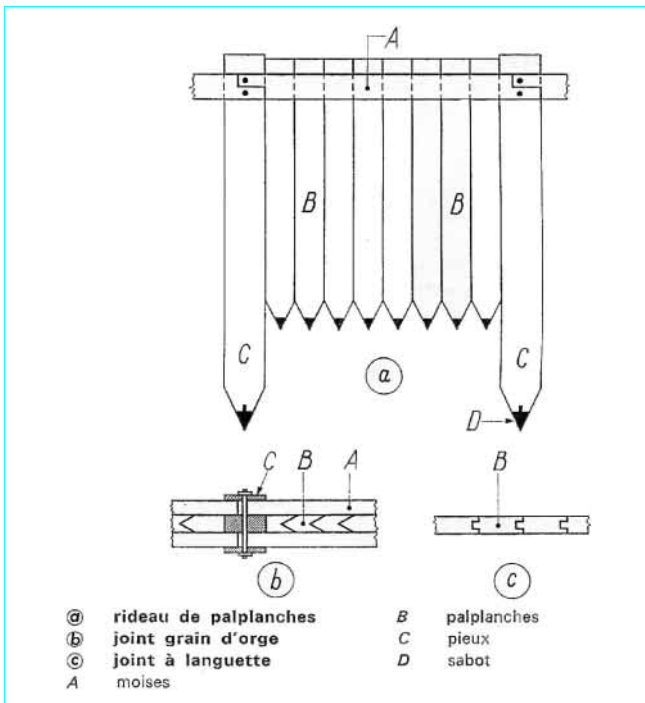


Figure 26 - Palplanches en bois

Les précautions évoquées au paragraphe 2.1.1.6 pour remédier aux défauts du bois leur sont applicables. Leur emploi reste limité à des ouvrages où l'alternance de sécheresse et d'humidité est exclue.

5.1.2 Palplanches en béton armé

Comme pour les palplanches en bois, ce n'est qu'à titre rétrospectif que nous en faisons état.

Ces palplanches étaient constituées de poutrelles préfabriquées en béton armé à section rectangulaire, comportant comme précédemment un système d'emboîtement ou de joint, assurant à la fois l'étanchéité du rideau et la solidarité des éléments.

Pour réduire les risques de détérioration sous les effets du battage, la mise en œuvre était généralement effectuée par lançage.

Tous les soins particuliers justifiés par leur fragilité, l'impossibilité de les réemployer, car le béton ne peut supporter les efforts d'arrachage, ont contribué à leur abandon au profit des palplanches métalliques, dont les performances sont considérablement plus intéressantes.

Les palplanches en béton armé étaient essentiellement utilisées pour des ouvrages définitifs, dans des terrains favorables à leur enfoncement, par exemple pour constituer le long des voies navigables des défenses de berges, des vannages, etc.

5.1.3 Palplanches métalliques

5.1.3.1 Caractéristiques

Le rôle de ces palplanches a fait l'objet du paragraphe 1.4. Les principaux types de palplanches métalliques à module en forme de U, Z, S, et de palplanches plates avec agrafes incorporées ou indépendantes sont représentés sur les figures 27 et 28.

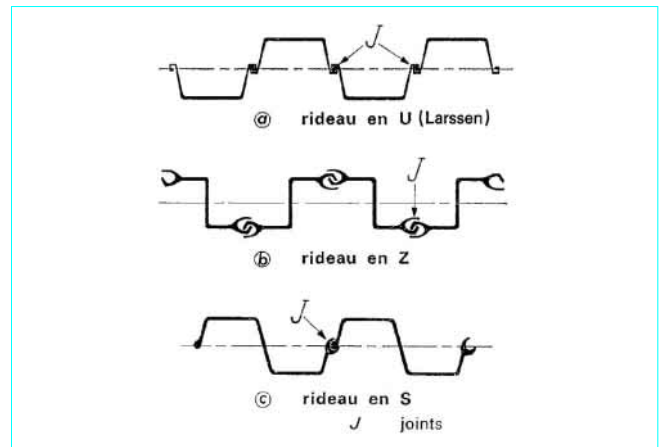


Figure 27 - Palplanches à module

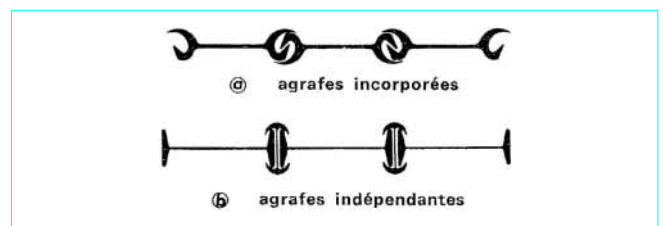


Figure 28 - Palplanches plates

À quelques nuances de dimensionnement près, tous ces types de palplanches sont produits par les fabricants mondiaux, mais la forme et les performances des joints restent une de leurs principales particularités.

En Europe, la production est assurée par Sacilor en France, Arbed au Luxembourg, Hoesch et Peine en Allemagne, British Steel Corporation en Grande-Bretagne. Elle rencontre sur le plan mondial la concurrence américaine Bethlehem Steel Corporation et japonaise Nippon Steel Corporation.

Les **profils Larsen** de Sacilor sont pratiquement les seuls utilisés en France (tableau 7).

Les performances des palplanches à module sont considérablement augmentées par l'emploi d'acier à haute résistance (tableaux 7 et 8).

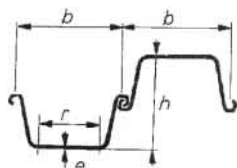
Pour éviter les sujétions de palplanches spéciales d'angle, Sacilor fabrique des joints *Oméga*, *Delta*, dénommés ainsi suivant l'ouverture de l'angle de raccordement des rideaux (figure 29).

En matière de palplanches plates, un seul modèle est produit en France, ce sont les *Rombas 400 J* et *500 J* (figure 30).

En revanche, des palplanches légères à module sont produites par PTE (Profilés et Tubes de l'Est) et Profilafröid. Ces palplanches, fabriquées par profilage à froid à partir de larges bandes d'acier, de faible épaisseur (3 à 6 mm), ont des valeurs intéressantes du module d'inertie par rapport au poids.

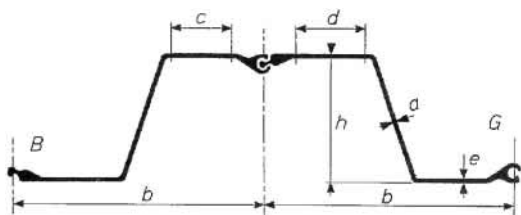
Pour des ouvrages relativement modestes, comme les défenses de berges, ces palplanches présentent des avantages économiques eu égard à leur faible masse au mètre carré de rideau, par rapport aux palplanches Larsen qui, elles, sont obtenues par laminage à chaud à partir de *blooms* (article *Généralités. Fabrications des demi-produits et étanches* [M 7 900] dans le traité *Matériaux métalliques*).

Tableau 7 – Profils Larssen et RZ : caractéristiques mécaniques (norme NF A 45-020)



Profil Larssen

Profil	Largeur utile <i>b</i> (mm)	Hauteur <i>h</i> (mm)	Épaisseur <i>e</i> (mm)	Largeur disponible entre ailes <i>r</i> (mm)	Périmètre développé (1) (cm/m)	Section (cm ² /m)	Masse		Module de résistance (cm ³ /m)	Moment d'inertie (cm ⁴ /m)	Rayon de giration (cm)
							Palpl. (kg/m)	Rideau (kg/m ²)			
SL 1 R	365	80	5,0	255	220	77	22,1	60,5	160	640	2,88
SL 2	450	130	6,0	305	230	92	32,4	72,0	300	1 950	4,61
SL 3	450	200	7,1	275	251	108	38,0	84,5	550	5 550	7,10
RL 60	600	226	7,5	340	234	98	46,2	77	600	6 750	8,30
RL 85	600	270	9,0	320	247	118	55,5	92,5	850	11 500	9,87
RL 120	600	310	9,9	370	264	136	64,2	107	1 200	18 600	11,69
31	450	150	9,5	250	230	127	45,0	100	460	3 450	5,21
III	400	247	14,0	250	278	198	62,0	155	1 360	16 800	9,20
IV	400	310	15,5	250	318	238	74,8	187	2 040	31 600	11,50
V	420	352	24,0	240	313	303	100,0	238	2 960	52 100	13,30
VI	420	438	23,5	230	361	369	122,0	290	4 200	92 000	15,80
II n	400	270	9,5	250	293	156	48,8	122	1 100	14 900	9,75
III n	400	290	13,0	250	307	198	62,0	155	1 600	23 200	10,85
II s	500	340	12,3	280	282	177	69,6	139	1 600	27 500	12,44
III s	500	380	14,1	270	294	201	79,0	158	2 000	38 000	13,73
IV s	500	440	15,5	240	311	224	88,0	176	2 500	54 800	15,70
V s	500	450	20,6	230	317	270	106,0	212	3 200	72 000	16,33



B boule

G griffe

Profil RZ

Profil	Largeur utile <i>b</i> (mm)	Hauteur <i>h</i> (mm)	Épaisseur		Largeur disponible		Paramètre développé (1) (cm/m)	Section (cm ² /m)	Masse		Module de résistance (cm ³ /m)	Moment d'inertie (cm ⁴ /m)	Rayon de giration (cm)
			Ailes <i>e</i> (mm)	Ame <i>a</i> (mm)	<i>c</i> (mm)	<i>d</i> (mm)			Palpl. (kg/m)	Rideau (kg/m ²)			
RZ 10	550	286	10,0	9,5	130	154	273	164	71,0	129	1 640	23 500	11,99
RZ 11	485	301	10,0	9,5	132	152	310	186	71,0	146	2 000	30 100	12,72
RZ 20 (2)	550	350	14,4	11,0	130	128	294	220	95,2	173	2 660	46 600	14,53
RZ 21 (2)	485	362	14,4	11,0	133	130	333	249	95,2	196	3 200	57 900	15,20
RZ 30 (2)	550	401	18,7	12,0	124	128	319	282	122,0	222	3 850	77 200	16,54

(1) Périmètre en contact avec le milieu extérieur, c'est-à-dire périmètre des joints exclu.

(2) Profil en cours de création : caractéristiques provisoires.

Les modules de résistance du rideau sont calculés en admettant que l'axe neutre coïncide avec la ligne des joints. Le frottement dans les joints et le frottement terre-palplanches dans le rideau en service sont généralement suffisants pour s'opposer au glissement relatif des profils, ainsi que le scellement des têtes dans un couronnement. Toutefois, dans les cas douteux, l'assemblage des palplanches par paires ou par trois, avec joints pincés, permet d'apporter un remède efficace à ce phénomène.
 $E = 210\,000\text{ N/mm}^2$.

Tableau 8 – Améliorations obtenues suivant les nuances d’acier (norme NF A 35-520)

Désignation	Limite d'élasticité minimale garantie R_e (N/mm ²)	Résistance minimale (1) (N/mm ²)	Allongement minimal (%)	Pliage à 180°		Contrainte admissible (en N/mm ²) (4)				
				$e \leq 16$ mm	$e > 16$ mm	$2/3 R_e$	$3/4 R_e$	$4/5 R_e$	$9/10 R_e$	R_e
E 240 SP	240	390	28	1 e	1,5 e	160	180	192	216	240
E 270 SP	270	440	25	1 e	1,5 e	180	202	216	243	270
E 320 SP	320	490	23	1,5 e	2 e	213	240	256	288	320
E 360 SP (2)	360	510	22	2 e	3 e	240	270	288	324	360
E 390 SP (2)	390	550	20	2 e	3 e	260	292	312	351	390
E 430 SP (3)	430	570	17	3 e	4 e	287	322	344	387	430

- (1) Sous réserve que les valeurs de limite d'élasticité et d'allongement soient respectées, il est admis une tolérance de 20 N/mm² sur la limite inférieure de résistance.
- (2) Nuance E 360 SP et E 390 SP : exclue pour le profil SL 1R.
- (3) Sur consultation ; nuance ne figurant pas dans la norme.
- (4) Les contraintes admissibles sont fixées par rapport à la limite d'élasticité. Elles dépendent en particulier des méthodes de calcul et de leurs hypothèses, des incertitudes sur les caractéristiques géotechniques, et des valeurs des charges permanentes et des surcharges prises en compte. Dans les méthodes de calcul classiques, la contrainte admissible de l'acier est généralement égale aux 2/3 de la limite d'élasticité pour les charges et surcharges normales de service. Elle peut être majorée pour les surcharges exceptionnelles ou pour les ouvrages provisoires dans certaines phases d'exécution. Pour les cas catastrophiques elle peut atteindre une valeur proche de la limite d'élasticité (Règles CM 1966). Dans les nouvelles méthodes de calcul aux états limites, la contrainte de calcul est égale à la contrainte théorique de l'état limite du rideau, affectée d'un coefficient de pondération qui dépend de la combinaison d'actions considérée.

d'acier, ou toute autre particularité à traiter lors de la fabrication ou du parachèvement en usine (palplanches spéciales, angles, renforcements, etc.).

5.1.3.2 Approvisionnement, manutention et stockage

En général, les délais d'approvisionnement demandés par le fournisseur sont de l'ordre d'un à trois mois. Ils sont fonction des programmes de laminage, des quantités, des profils choisis et du délai de transport.

Ce dernier, suivant les cas, peut être traité par route s'il s'agit de petites quantités à livrer rapidement, par rail ou par voie d'eau, dans la mesure où les chantiers sont desservis et où le délai le permet ; cette dernière solution est généralement la moins coûteuse.

Sur le site, les palplanches doivent être stockées avec soin pour éviter leur détérioration, permettre leur classement et faciliter la reprise pour mise en fiche. Les manutentions s'effectuent à l'aide de *maines* spéciales (figure 31) pour déplacer les palplanches à module en position horizontale, et à l'aide de *crochets à broche* utilisant le trou de manutention, ou d'*élingues* ceinturant les palplanches, pour les dresser en vue de la mise en fiche (figure 32).

5.2 Conditions d'emploi

5.2.1 Rôles définitif et provisoire. Étanchéité. Pénétration

Les palplanches peuvent être incorporées aux ouvrages (quais, écluses, protections de berge, murs de soutènement, parafouilles) et constituent alors des *rideaux définitifs*, ou peuvent être utilisées pour la construction des ouvrages (batardeau en rivière, écran d'étanchéité, blindage de fouille) et constituent alors des *rideaux provisoires* (§ 1.4).

Le premier cas mérite des soins plus importants ; il engage à la fois la responsabilité du maître d'ouvrage, celle du maître d'œuvre et celle de l'entrepreneur. Le second cas est considéré comme un procédé d'exécution de l'ouvrage principal définitif et relève de l'entière responsabilité de l'entrepreneur ; dans ce cas, les palplanches devant être arrachées lors de leur mise en œuvre, on devra éviter un battage intensif pouvant occasionner des déformations rendant impossible leur récupération.

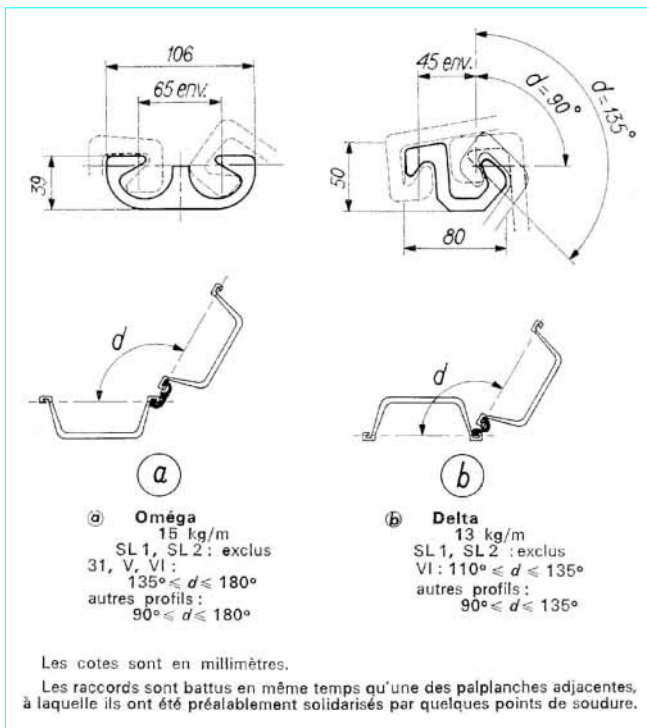


Figure 29 – Raccords Sacilor

Comme nous l'avons mentionné au paragraphe 2.1.4, l'acier est vulnérable à la corrosion, et à cet égard des précautions sont à prendre ; entre autres, l'adjonction de cuivre doit faire l'objet d'option à décider lors de la commande. Il y a lieu, également à la commande, de préciser au fabricant si les palplanches seront *enclenchées par paire* ou non, avec *joints pincés* ou non, munies de *trous de manutention*, si elles comporteront des *marquages* permettant l'identification des profils et des différentes nuances

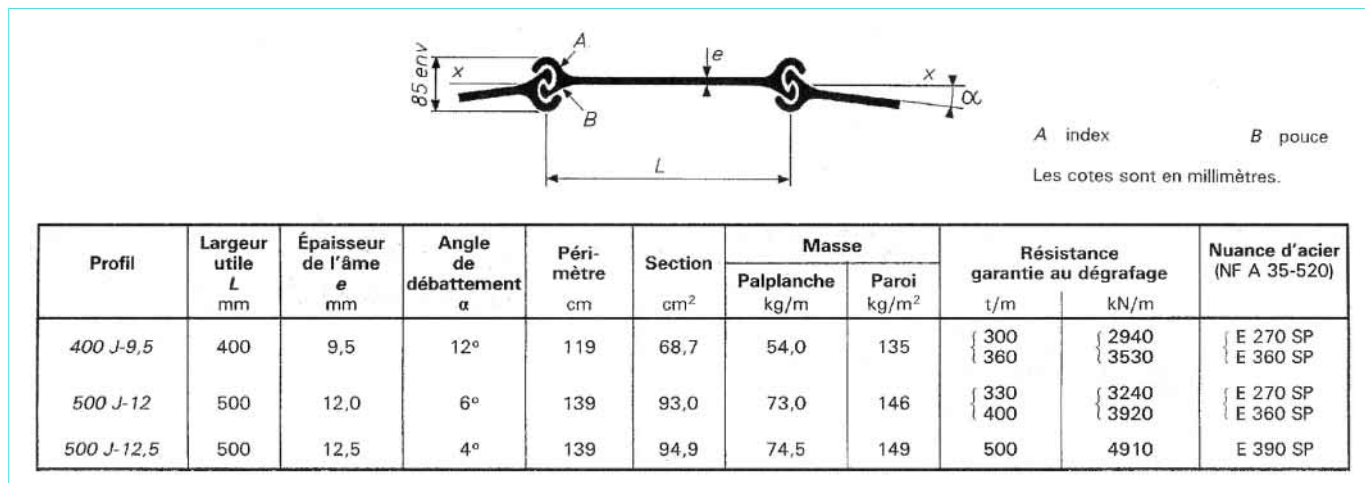


Figure 30 – Palplanches Rombas : caractéristiques

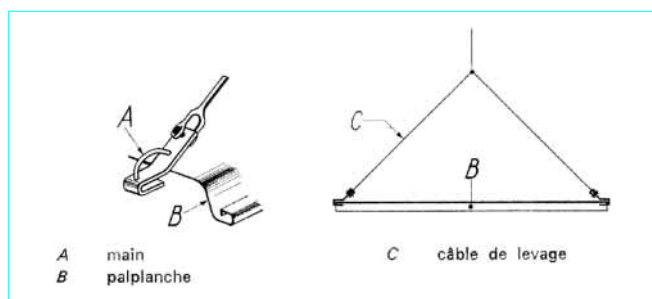


Figure 31 – Mains pour manutention des palplanches

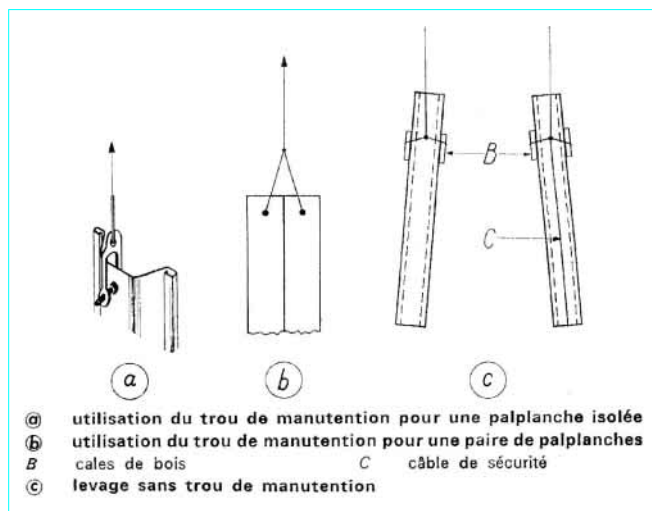


Figure 32 – Levage des palplanches à l'aide de crochets à broche ou d'élingues

Nous verrons au paragraphe suivant les différentes conditions de stabilité des rideaux de palplanches à l'occasion des dispositions de calcul ; en revanche, une des qualités attendues de ces rideaux, lorsqu'ils constituent des batardeaux, sera leur étanchéité.

Cette étanchéité est réalisée au niveau des joints : par leur colmatage à l'aide de scories, de sciure, ou de cordons en caoutchouc ou en plastique ; et au niveau du pied : soit en l'encastant dans une couche étanche, soit en donnant aux palplanches une fiche suffisante pour éviter son contournement (conditions de Renard).

La pénétration des palplanches dans le sol pose des problèmes de choix de module, de techniques, et de moyens de battage dont les solutions sont l'affaire des spécialistes, chaque cas conduisant à des dispositions qui sont fonction des indications connues et de l'expérience acquise.

5.2.2 Calcul des ouvrages en palplanches

Les bases du calcul des rideaux de palplanches, en particulier les notions de poussées et butées, font l'objet des articles de Mécanique des sols (en particulier l'article *Ouvrages de soutènement. Poussée et butée* [C 242]).

Les cas d'application sont multiples et ne peuvent être développés ici.

5.2.2.1 Rideaux plans, dits rideaux simples

Ils peuvent être encastrés ou non en pied ou en tête, renforcés ou non d'un ou de plusieurs niveaux de tirants ou d'étais (figure 33).

Les calculs peuvent être conduits soit suivant des méthodes classiques découlant de la loi de Coulomb, méthodes de Blum et dérivées, qui peuvent être traitées par méthode analytique ou par méthode graphique, soit par des méthodes élastoplastiques, qui, grâce aux possibilités des ordinateurs, font de plus en plus l'objet des programmes de calcul et font intervenir les modules de réaction.

Tous ces calculs doivent prendre en compte les caractéristiques des sols, les niveaux d'eau, les surcharges, les différents cas d'application des efforts pendant et après la construction, les effets dus aux variations de niveaux d'eau de part et d'autre des rideaux, et les affouillements éventuels.

Ces calculs permettent de déterminer la fiche à donner aux palplanches et le module d'inertie nécessaire. Des considérations de pénétration ou de possibilité de battage peuvent éventuellement intervenir pour le choix définitif de la solution.

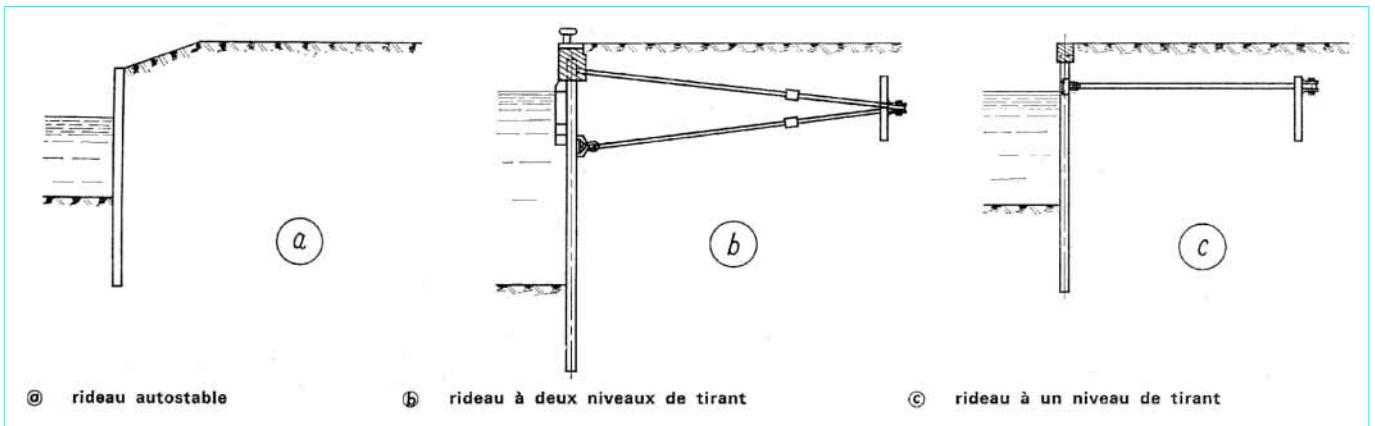


Figure 33 – Rideaux plans

Les dispositifs de renforcement des rideaux plans, *liernes*, *butons* (éléments allongés en bois, en métal, rarement en béton, reprenant des efforts de poussée) ou *tirants*, feront également l'objet de calculs de stabilité établis suivant toutes les hypothèses précitées.

5.2.2.2 Ouvrages massifs. Rideaux doubles ou gabions

Ces ouvrages ont la particularité de résister aux forces extérieures par leur propre poids (figure 34).

Ils sont utilisés lorsqu'un simple rideau de palplanches est insuffisant ou mal adapté compte tenu :

- soit de la nature des sols (présence de rocher proche ou de terrain de mauvaise qualité sur une grande hauteur) ;
- soit de la limitation des emprises éliminant les possibilités d'ancrage ;
- soit de l'importance des efforts d'accostage et d'amarrage (quais et ducs d'Albe).

Deux types d'ouvrages de cette nature sont à considérer.

■ Les **structures à deux rideaux parallèles** sont constituées de palplanches à module, encastrées ou non en pied, et maintenues en tête par une ou plusieurs nappes de tirants (figure 34a).

■ Les **gabions** sont constitués par des palplanches plates, conçues pour offrir une grande résistance au dégrafage ; ils sont de deux types, suivant leur tracé en plan :

- gabions cylindriques (figure 34b) ;
- gabions cloisonnés (figures 34c et d).

Les ouvrages massifs sont caractérisés par l'association de deux matériaux très différents : la paroi métallique et le massif interne en terre que constituent les remblais. Le calcul doit vérifier :

- la résistance des parois métalliques ;
- la résistance du massif interne ;
- la stabilité de l'ensemble considéré comme un pseudo-solide dans le sol de fondations.

Ces conditions ne sont pas toujours indépendantes.

Les calculs des parois sont conduits différemment dans le cas des rideaux parallèles et dans le cas des rideaux circulaires. Pour les premiers, la méthode reprend le principe des rideaux plans (§ 5.2.2.1) ; pour les seconds, la traction transversale dans les palplanches est donnée par la *formule des tuyaux* :

$$T = PR$$

avec *P* pression sur la paroi,
R rayon de la cellule.

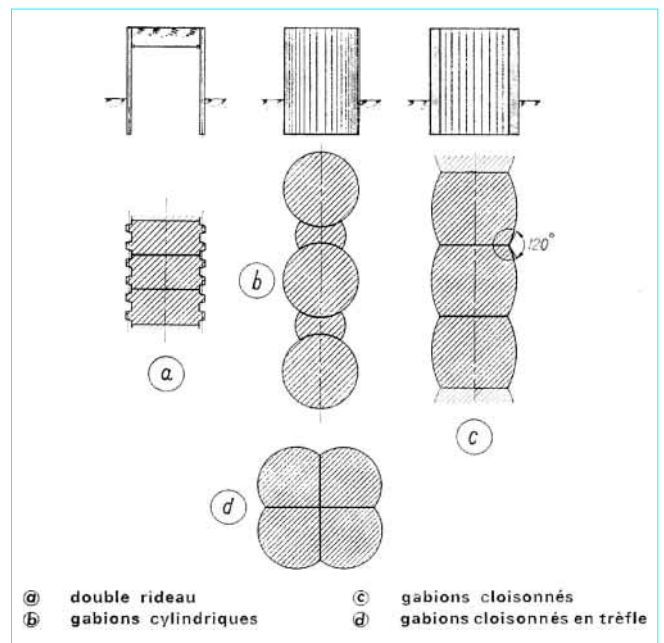


Figure 34 – Ouvrages massifs

La vérification de la résistance du massif interne et de la stabilité de l'ensemble fait l'objet de différentes méthodes de calcul que nous ne pouvons développer ici (méthodes de Terzaghi, Cummings, Schnebili, Kilajima, Brinch, Hansen), leur originalité étant principalement la forme de la surface de rupture interne du remblai. Toutes ces méthodes et tous ces procédés de calcul ont donné lieu de la part des mécaniciens du sol et des ingénieurs constructeurs à une abondante littérature, à laquelle nous conseillons de se reporter pour l'établissement des projets [15] [16].

5.3 Mise en œuvre des palplanches

Elle est réalisée en plusieurs phases que nous allons décrire dans l'ordre chronologique.

5.3.1 Mise en fiche

Elle comprend la *reprise* d'une palplanche ou d'une paire de palplanches sur le stock, sa *manutention* pour la présenter verticalement dans le dispositif de guidage, son *enclenchement* dans le joint de la palplanche déjà mise en fiche, et le début du *fonçage* réalisé à l'aide de moyens légers comme le mouton à double effet [trépideur ou de vibrateurs (§ 4.1.2.3 et 4.2)].

Durant cette opération, les palplanches sont maintenues pendant le fonçage par les installations de guidage constituées par des *moisages*, dans le cas de rideaux plans, ou par des *gabarits*, dans le cas de rideaux circulaires.

Le fonçage doit être conduit avec précaution, pour éviter les déviations et utiliser convenablement l'autoguidage des joints. À cet effet, il est recommandé, dans le cas des cellules circulaires en palplanches plates, de les fermer complètement avant de commencer le battage.

5.3.2 Battage et surbattage

Cette opération consiste à enfoncer les palplanches, jusqu'à atteindre la cote définitive, à l'aide de moyens de battage plus puissants et mieux adaptés, utilisables lorsque les palplanches ont une fiche convenable pour en subir les effets sans risques de déviation. Le battage nécessite parfois d'intervenir plus particulièrement sur une ou plusieurs palplanches en insistant plus longuement ; cette opération est appelée *surbattage*. À ce stade du fonçage, les engins utilisés sont des moutons à simple effet ou Diesel (§ 4.1.2.2 et 4.1.2.4).

Lorsque le sol est peu cohérent et constitué par des matériaux granuleux (graviers, sables grossiers peu compacts et saturés d'eau), le vibrofonçage (§ 4.2) est la technique la plus efficace, et applicable de la mise en fiche à la fin du battage.

En fonction de la nature des sols et des possibilités des palplanches, le spécialiste de battage sera amené à employer des matériels de fonçage qui pourront varier suivant les niveaux d'enfoncement et le rôle attendu des palplanches.

Les résultats des battages d'essais, qu'il est recommandé d'effectuer avant d'arrêter les dispositions du projet, sont également très utiles pour guider le choix des techniques de battage.

5.3.3 Arrachage

Nous avons vu (§ 5.2.1) que, lorsque cette opération est prévue, le battage doit être conduit avec précaution, de façon que l'arrachage ne pose pas de difficultés insurmontables et que les palplanches soient réutilisables.

L'arrachage est obtenu par l'effet conjugué d'un effort permanent de traction sur la palplanche ou la paire de palplanches, et d'une vibration ou d'un battage de bas en haut, qui peuvent être produits :

- soit par un **trépideur retourné** (§ 4.1.2.3) ;
- soit par un **arracheur**, appareil spécialement conçu à cet effet et fonctionnant à la vapeur, à l'air comprimé, ou Diesel, les plus gros étant capables d'énergie de frappe de plus de 10 kJ ;
- soit par un **vibrateur** électrique ou hydraulique.

Cette opération nécessite des engins de levage suffisamment puissants pour assurer la traction utile sous crochet, qui doit être généralement de 2 à 4 fois le poids de l'arracheur et de la palplanche à arracher, ce qui peut conduire à des efforts de l'ordre de 200 à 250 kN.

La fixation aux palplanches et la tenue de l'ensemble, lorsque celles-ci décollent parfois brutalement, nécessitent des précautions particulières pour éviter un brusque déséquilibre de l'engin de levage. Ces précautions consistent à veiller à la qualité des attaches

et des éléments en traction, à disposer éventuellement des calages de sécurité, à suivre avec beaucoup d'attention le relèvement des palplanches et à moduler les efforts en conséquence.

En vue du **réemploi** des palplanches après arrachage, il est nécessaire de les reconditionner par **recépage** de la longueur déformée à la tête et au pied.

5.4 Recommandations et contrôles

La surveillance constante des palplanches durant leur fonçage donne au spécialiste des indications indispensables à la conduite de son chantier.

Les *déformations* de la tête des palplanches peuvent signifier que l'engin de battage est inadapté ou mal centré, ou que le casque ne convient pas. On peut aussi en déduire que la nuance d'acier utilisée est trop faible, mais aussi et surtout qu'il peut se produire des incidents au pied de palplanches, ce qui indique :

- soit que la palplanche rencontre un obstacle ;
- soit qu'elle atteint sa cote définitive.

Comme pour les pieux, il est recommandé d'établir un *carnet de battage* qui, pour chaque palplanche, fait état de tous les éléments qui caractérisent le fonçage (cote atteinte à la mise en fiche, temps de fonçage, engins utilisés, arrêts de fonçage et leurs raisons).

L'*alignement* et la *verticalité* des rideaux doivent être suivis en permanence, car les palplanches ont tendance à se déverser dans le plan du rideau à battre et dans la direction de l'avancement ; il importe d'y remédier dès que cette tendance apparaît.

Plusieurs méthodes sont possibles, et le batteur doit être le plus averti pour adopter celle qui donne des résultats satisfaisants et évite soit l'emploi de palplanches spéciales trapézoïdales (occasionnant des dépenses supplémentaires dues à l'immobilisation du chantier durant leur fabrication, et constituant dans l'ouvrage un point singulier qui peut quelquefois affaiblir les performances), soit l'arrachage des palplanches déversées.

Pour remédier aux déformations des palplanches soit en tête, soit en pied, et quelquefois aux effets de *vrillage*, on peut être amené à modifier les dispositions de guidage, les moyens de battage, et parfois à revenir sur le choix du profil ou de la nuance d'acier.

Les *dégrafages*, les *déchirures* et les *enroulements* de palplanches sont des incidents difficiles à déceler, qui se produisent généralement dans le sol et que seule l'expérience du batteur ayant une connaissance du site permet d'éviter par un choix judicieux des procédés d'exécution et des profils des palplanches.

5.5 Dispositions particulières à l'emploi des palplanches

5.5.1 Protection contre la corrosion

L'expérience montre que l'adjonction de cuivre ne donne pas souvent de résultats satisfaisants, et que d'autres précautions sont à prendre.

La corrosion est considérablement accentuée par l'effet alterné d'air et d'eau, notamment en site marin où des diminutions d'épaisseur de 0,2 à 0,3 mm par an ont pu être observées dans les zones tropicales ou équatoriales.

En France, les vitesses de corrosion habituellement admises sont de 0,01 à 0,02 mm/an en eau douce et de 0,10 à 0,14 mm/an en eau salée. Pour pallier de tels inconvénients, plusieurs solutions sont possibles.

5.5.1.1 Protection par revêtement

Ces revêtements nécessitent, avant application, des préparations de surface (sablage, grenailage) et sont constitués soit de revêtements bitumineux ou d'époxy brais, soit de revêtements actifs à base de silicate de zinc, appliqué en monocouche ou en une couche primaire d'époxy zinc suivie d'une couche de finition d'époxy brai.

Ce sont actuellement ces dernières dispositions qui ont donné les meilleurs résultats, mais leur rôle protecteur est limité à des durées de 10 à 15 ans.

5.5.1.2 Protection cathodique

Le système est théoriquement parfait ; c'est une protection par immunité, obtenue par l'application d'un potentiel suffisamment négatif du métal (moins quelques millivolts) par rapport à une électrode de référence impolarisable (type électrode de cuivre, sulfate de cuivre).

Deux méthodes sont possibles : soit en produisant un courant à l'aide d'un générateur électrique, soit en constituant une pile dont la structure à protéger est la cathode reliée électriquement à des anodes en zinc, aluminium ou magnésium qui se consomment au cours du temps.

Ces solutions sont coûteuses, la première en entretien, la seconde plus particulièrement à l'installation, mais elles sont souvent rentabilisées et peuvent, dans certains cas, être décidées après la construction, à la suite des observations faites sur le comportement de l'ouvrage à la corrosion, si l'installation de ces protections cathodiques ne remet pas en cause les dispositions d'exécution réalisées ; c'est le cas des ouvrages totalement métalliques (appontement, quai en palplanches).

5.5.1.3 Adaptation des profils

Cette méthode consiste à adopter un profil d'épaisseur ou de module plus élevé que le minimum nécessaire déterminé par le calcul, ou à utiliser une nuance d'acier ayant de plus hautes caractéristiques mécaniques. Il est évident que ces dispositions ne peuvent être valablement prises qu'en fonction d'indications connues sur l'effet de la corrosion dans le site considéré.

5.5.2 Protection contre les nuisances

La principale sujétion d'utilisation en site urbain des engins de battage est leur **niveau sonore** qui, mesuré à 7 m, est de l'ordre de 90 à 100 dB pour les moutons, et peut atteindre 110 dB pour les trépideurs.

La solution la plus courante pour limiter le niveau sonore est d'envelopper les sources de bruits ; certains constructeurs ont ainsi proposé l'emploi de *housses* constituées de sandwichs de matériaux lourds et absorbants. Pour être efficaces, ces dispositifs doivent également envelopper la palplanche à battre, ce qui conduit à des installations fort coûteuses, eu égard aux abaissements relativement modestes du niveau sonore obtenus (au mieux de l'ordre de 20 à 25 dB).

Lorsque les sols le permettent, de meilleurs résultats sont atteints par l'emploi de vibrateurs dont le niveau sonore est très acceptable lorsque les palplanches ne rencontrent pas d'obstacles durant le fonçage.

En Grande-Bretagne, et dans le cas de terrains favorables, un appareil totalement silencieux, constitué d'un système de vérins, prenant appui sur une poutre fixée à un ensemble de palplanches, a été utilisé avec succès, mais n'a pas donné en France, où les terrains sont plus hétérogènes, de résultats satisfaisants.

5.6 Conditions économiques

Plusieurs facteurs sont à prendre en considération pour évaluer le coût des ouvrages en palplanches.

En premier lieu et pour la plus grande part, c'est le **prix de la fourniture** qui doit être pris en compte. Actuellement, le coût de la tonne de palplanches varie, suivant les profils et les nuances, de 3 400 à 4 600 F (1985) au départ d'usine.

Ensuite, intervient le **coût des transports** (§ 5.1.3.2), qui conduit généralement, en tenant compte des sujétions de chargement ou de déchargement, à des majorations, pour la métropole, de l'ordre de 6 à 10 % du prix de la fourniture et, pour des ouvrages construits sur d'autres continents, à des majorations de l'ordre de 30 %.

Le **coût de la mise en œuvre** est beaucoup plus aléatoire, il est fonction des conditions de site, de la nature du sol, de la longueur et du module des palplanches, des conditions d'exécution des battages, des ressources locales en matériel et personnel, des conditions d'accès et d'éloignement. Il est donc difficile de fixer des prix de revient de la mise en œuvre des palplanches ; on peut toutefois estimer que son coût conduit à des majorations de 20 à 50 % du prix de la fourniture rendue.

Dans la plupart des cas, les ouvrages en palplanches sont en compétition avec les ouvrages en béton armé. Dans cette comparaison, il y a lieu de considérer que les palplanches constituent souvent la solution la plus rapide d'exécution, pouvant être exploitée immédiatement, et que le produit mis en œuvre a l'avantage d'être largement éprouvé et contrôlé en usine avant d'être mis en service.

Pieux et palplanches

par **Pierre BOUSQUET**

Ingénieur de l'École des Travaux Publics
Directeur aux Entreprises Morillon Corvol Courbot (EMCC)

Références bibliographiques

- [1] GRAUX (D.). – *Fondations et excavations profondes*. Eyrolles (1967).
- [2] LÉONARD (G. A.). – *Les fondations*. Dunod (1968).
- [3] DAVIDIAN (Z.). – *Pieux et fondations sur pieux*. Eyrolles (1969).
- [4] *Pieux en béton moulés à l'avance*. Ann. ITBTP (F), n° 162, juin 1961.
- [5] PAQUET (J.) et BRIARD (M.). – *Contrôle non destructif des pieux en béton*. Ann. ITBTP, n° 128, mars 1976.
- [6] BRU (J. P.). – *Problèmes d'exécution des pieux forés*. Bull. Labo. P. et C. (F), mai-juin 1975.
- [7] GRAUX (D.). – *Calcul des fondations profondes*. CACT (1973).
- [8] GRAUX (D.). – *Résistance des pieux à la traction*. Ann. ITBTP (F), n° 130, déc. 1970.
- [9] THOMA (W.). – *Comportement des pieux de fondations*. Revue Travaux (F), janv. 1974.
- [10] GONIN (H.). – *Études théoriques du battage des corps élastiques élancés*. Ann. ITBTP (F), n° 155, mai 1978.
- [11] GEFFRIAUD (J. P.). – *La force portante d'un pieu isolé T. 148*, Génie Civil (F), juil. 1971.
- [12] GRESILLON (J. M.). – *Détermination de la limite de la force portante de pointe d'un pieu en milieu pulvérulent*. Génie Civil (F), fév. 1972.
- [13] TCHENG (Y.). – *Fondations profondes en milieu pulvérulent*. Ann. ITBTP (F), n° 219/220 (1966).
- [14] *Calcul de la force portante des fondations sur la base des résultats des essais pressiométriques*. Soils-Soils, II, n° 5 et 6, juin et sept. 1963.
- [15] KERISEL (J.) et ADAM (M.). – *Fondations profondes*. Ann. ITBTP (F), n° 179 (1962).
- [16] HOUY (A.). – *Calcul des ouvrages en palplanches métalliques*. Sidelor (1965).
- [17] HAIUN (G.) et CORNET (D.). – *Guide pratique pour l'utilisation des palplanches métalliques*. Sacilor (1975).
- [18] *Guide de chantier (niveau 3)*. SETRA Division des ouvrages d'art (1976).
- [19] HAIUN (G.). – *Progrès récents dans l'efficacité des moyens de mise en œuvre des palplanches métalliques*. Revue Travaux Sci. Industries (F), janv. 1975.
- [20] MORANDIÈRE (R.). – *Traité et construction des ponts et viaducs*. In NOE (E.) et TROCH (L.) — *Pieux et sonnettes*. Gauthier Villars, p. 16 (1920).

Constructeurs. Fournisseurs

Boehler Flop.
BSP.
Casagrande.
Calweld Division of Smith International Inc.
Delmag France.
Demag Spiros.
Fondamat (Sté).
Galinet.
Hausherr et Spec.
Pajot (Éts A.).
Procédés Techniques de Construction.
Raymond International Inc.
Salzgitter Maschinen AG.
SOIL-MEC.

Tifine (Éts).
Williams Hughes (Hughes Tool Co.).
Wirth (Sté).

Fabricant de palplanches et de pieux métalliques
Arbed SA. (Aciers Réunies de Burbach-Eich-Dudelange).
Bethlehem Steel Corp.
British Steel Corp. (BSC).
Hoesch AG.
Nippon Steel Corp.
Profilafroid.
Profilés et Tubes de L'Est SA.
Sacilor (Sté) (Acieries et Laminiers de Lorraine).
Usinor (Union Sidérurgique du Nord et de l'Est de la France).