

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 96 (1970)
Heft: 24

Artikel: Les fondations des broyeurs de la cimenterie du Havre-Saint-Vigor
Autor: Dysli, Michel
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-70880>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 26.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Les fondations des broyeurs de la cimenterie du Havre-Saint-Vigor¹

par MICHEL DYSLI, ingénieur EPFL à la Société Générale pour l'Industrie

1. Description de la cimenterie

Une capacité annuelle de 1 120 000 t, soit le quart de la production suisse en 1968, un procédé de fabrication à sec avec un four rotatif de 3000 t/jour, un échangeur de chaleur de quelque 90 m de hauteur, des silos pouvant stocker jusqu'à 130 000 t de cru, ajouts, clinker et ciment, trois broyeurs d'une puissance totale de 9000 kW, voici en quelques mots et chiffres approximatifs, la description de la Cimenterie du Havre-Saint-Vigor implantée à quelque 15 km à l'est du port du Havre, sur les terrains de la zone industrielle.

La conception de cette usine est basée sur les expériences les plus récentes de l'industrie du ciment, elle comprend en particulier certaines nouveautés comme le broyage préliminaire avec séchage du cru dans un broyeur autogène, pour le broyeur à ciment un moteur à très basse vitesse dont le rotor est fixé sur le tambour et l'automatisation intégrale du contrôle du procédé de fabrication au moyen d'un ordinateur.

Depuis l'étude préliminaire, la réalisation de cette cimenterie a pris environ trois ans et demi, les travaux proprement dits s'étant étendus sur deux années environ.

2. Terrains

Cette cimenterie est implantée dans l'estuaire de la Seine, dont l'évolution morphologique s'est esquissée à la fin de l'ère tertiaire pour se poursuivre pendant le quaternaire.

Elle est liée au creusement et au remblaiement correspondant aux transgressions ou régressions de la mer. Le Jurassique ou le Crétacé constituent le bedrock qui est recouvert par les dépôts alluvionnaires du quaternaire. Sous la cimenterie, le bedrock, soit l'Albien, a été rencontré à 40 m de profondeur environ. En surface, les dépôts alluvionnaires ont été recouverts par un remblai hydraulique de 1,50 m à 2 m d'épaisseur ; les matériaux de ce remblai proviennent du creusement du Canal maritime du Havre à Tan-carville.

Du haut vers le bas, les dépôts alluvionnaires se décomposent en les différentes couches suivantes :

- le remblai hydraulique de 1,50 m à 2 m d'épaisseur ;
- des limons argileux peu plastiques de 1,50 m d'épaisseur environ ;
- des sables limoneux de 3,50 m d'épaisseur environ ;
- l'ensemble des sables gris-vert de 16 à 20 m d'épaisseur, d'homogénéité assez grande et de granulométrie serrée ;
- une série de niveaux lenticulaires d'une épaisseur de 7 à 10 m. Ces dépôts vont des graviers aux limons organiques ;
- une couche de galets graveleux appelée « mélange compact » de 3 à 8 m d'épaisseur environ ;

¹ Conférence donnée le 7 novembre 1969 à la réunion de Lucerne de la Société suisse de mécanique des sols et des travaux de fondation.

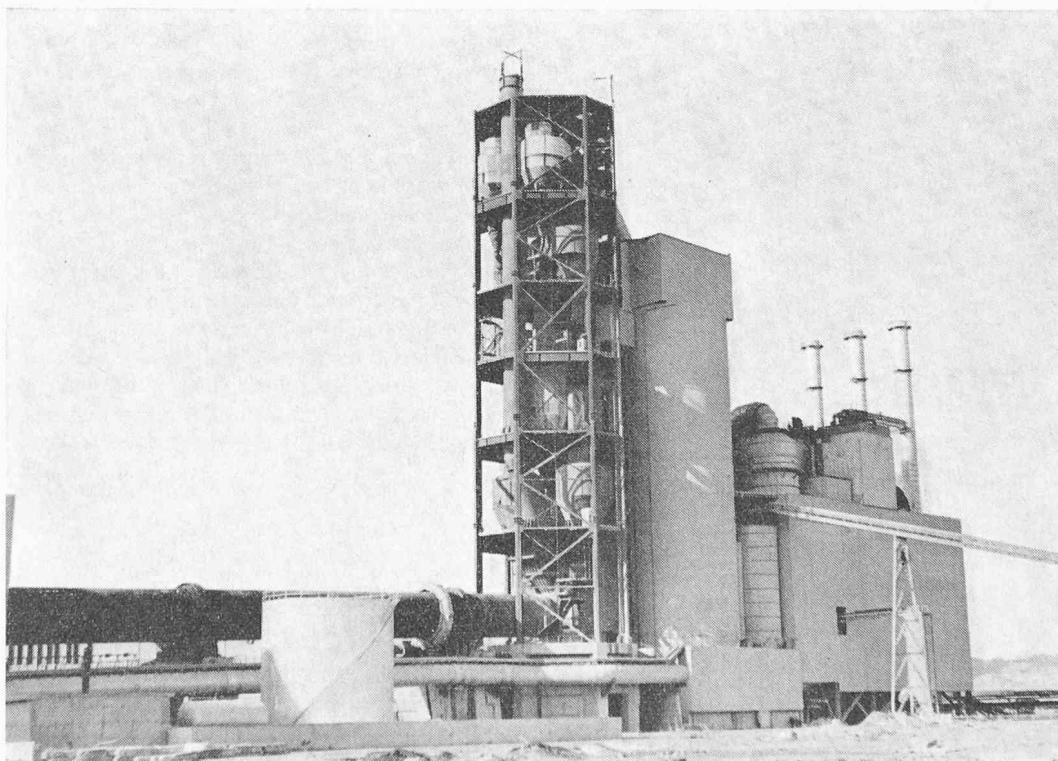


Fig. 1 — Partie nord de la cimenterie.

De droite à gauche : halle préparation du cru, stockage des ajouts et du cru, tour de l'échangeur, four.

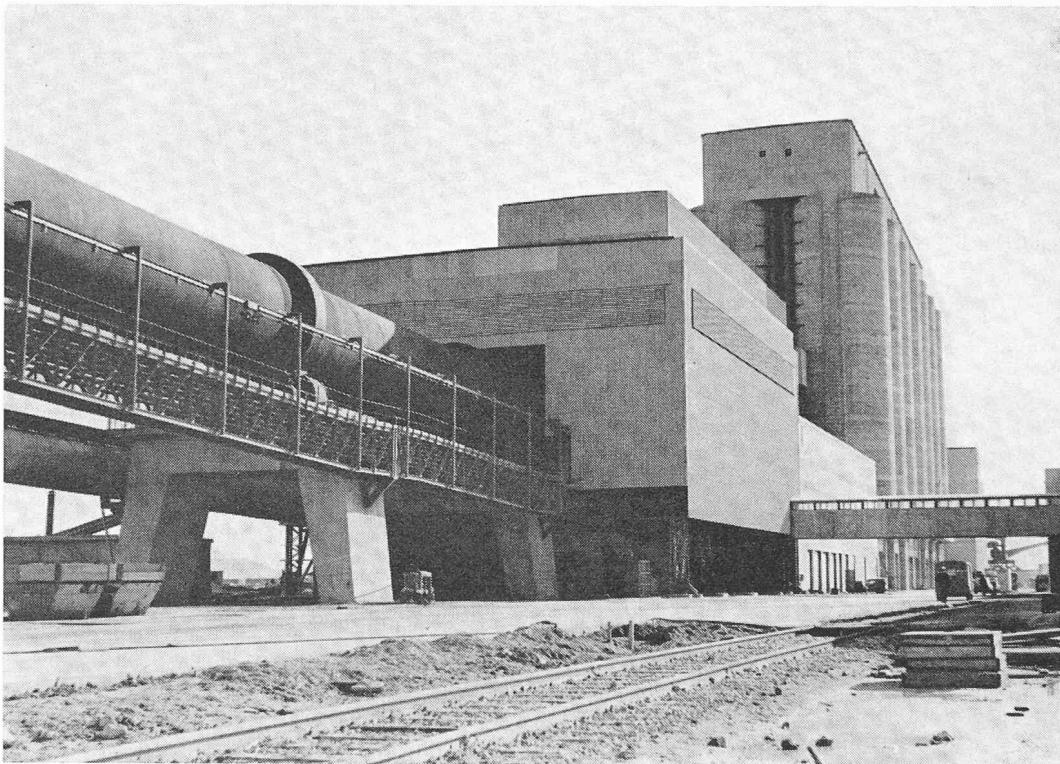


Fig. 2 — Partie sud de la cimenterie.

De gauche à droite : four, halle du refroidisseur, halle de préparation du ciment, centre de distribution de l'électricité, silos de stockage clinker et ciment.

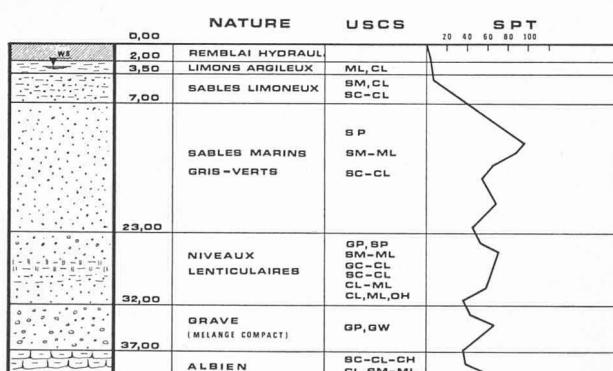


Fig. 3. — Coupe schématique des terrains.

- l'Albien, soit le premier niveau des terrains en place du Crétacé, d'une épaisseur de 25 m environ ;
- le Kiméridgien.

Une première nappe phréatique est contenue dans les sables gris-vert. Son niveau supérieur voisine la cote $-2,50$ m. Une deuxième nappe noie le « mélange compact » ; elle est en communication avec la Seine et son niveau piézométrique suit, avec un certain déphasage, le régime des marées, ce qui n'est pas le cas de la nappe supérieure.

La figure n° 3 donne une représentation graphique de la stratigraphie et des qualités de ces terrains ; on voit que du point de vue des fondations ils sont très médiocres en surface et vont en s'améliorant avec la profondeur jusqu'à une cote de -12 m environ ; le diagramme SPT est très représentatif de ce phénomène.

Puisque notre propos traite d'effets de vibrations, signalons en passant que, sous la batterie des silos à clinker et ciment d'un poids total d'environ 200 000 t, fondée sur un radier à 6 m de profondeur, les sables marins ont été consolidés avec succès au moyen de la vibroflottation, ce qui

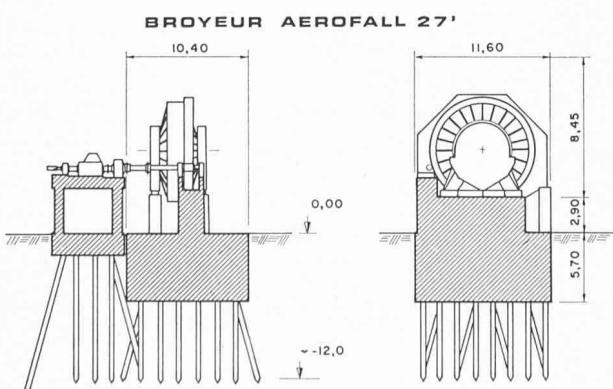


Fig. 4. — Broyeur préliminaire du cru.

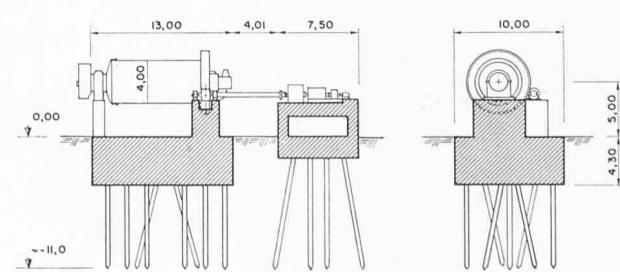


Fig. 5. — Broyeur finisseur du cru.



Fig. 6. — Broyeurs du cru en construction.

nous a permis d'admettre des contraintes de plus de 5 kg/cm² sous ce radier. La densité sèche a été, par ce traitement, améliorée d'environ 15 % en moyenne, mais elle a été légèrement diminuée entre 12 et 14 m de profondeur, soit dans la zone des sables marins légèrement indurés ; il y a eu, dans cette zone, une diminution de la cohésion existante.

3. Broyeurs

3.1 Broyeurs du cru

La craie transportée depuis la carrière au moyen d'une bande aboutit à un premier broyeur ; le broyeur préliminaire qui la sèche, la broie grossièrement et la sépare des silex qui y sont contenus (fig. 4).

La capacité de cet autobroyeur est de 230 t/heure, son diamètre de 9 m environ, son épaisseur de 2 m, sa vitesse de rotation de 12,4 t/min et son poids avec son contenu de 490 t. Il est entraîné par un moteur de 1050 kW agissant sur le tambour par l'intermédiaire d'un réducteur.

Le tambour du broyeur repose sur deux appuis en béton armé, liés entre eux sous le niveau du sol par un massif de fondations parallélopipédiques en béton armé.

Le groupe de commande (moteur-réducteur) repose sur une table de quelque 4 m de hauteur, supportée par quatre piliers encastrés dans un massif de fondation séparé du massif du tambour.

Ces deux massifs sont supportés par une batterie de pieux préfabriqués en béton armé de 40×40 cm de section, battus jusqu'à un refus de 300 t, calculé par la formule de Crandall.

La réalisation des massifs de ce broyeur a nécessité un abaissement de la nappe phréatique. Juste avant le montage du broyeur préliminaire, le contact entre le massif et le terrain a été injecté au moyen d'un coulis de ciment, ceci de manière à intéresser le plus possible la masse du terrain, sous le broyeur, dans l'amortissement des vibrations.

Après avoir passé dans un classificateur et des cyclones, la craie traitée est ensuite dirigée vers un silo de stockage. Elle est prélevée dans ce dernier, pour être conduite à un

séparateur puis au broyeur finisseur, qui reçoit aussi les ajouts soutirés dans leur silo respectif (fig. 5).

Ce broyeur à boulets a une capacité de 250 t/h, sa longueur est de 8 m, son diamètre de 4 m, sa vitesse de 15 t/min et son poids avec son contenu de 400 t. Il est entraîné par un moteur de 2000 kW, agissant sur le tambour par l'intermédiaire d'un réducteur. Le broyeur finisseur et son groupe de commande sont fondés sur un dispositif semblable à celui du broyeur préliminaire.

Pour les deux broyeurs du cru, le rapport du poids de la fondation sur le poids du broyeur et de son contenu est de 3,5 environ.

3.2 Broyeur à clinker

A la sortie du broyeur finisseur, le cru est conduit dans des silos d'homogénéisation, puis au sommet de la tour de l'échangeur dans laquelle il est porté à une température d'environ 800°C, à son pied il pénètre dans le four qui le transforme en clinker. Ce clinker est refroidi dans le refroidisseur, puis est stocké dans les silos à clinker d'une capacité de 48 000 t. Il est soutiré de ces silos, puis conduit par un transporteur à bandes jusqu'au broyeur à clinker (fig. 7). Pendant ce transport sa composition chimique a été corrigée, si nécessaire, par l'adjonction d'ajouts.

Ce broyeur à boulets est constitué par un tambour de quelque 16,5 m de longueur et de 5 m de diamètre, entraîné

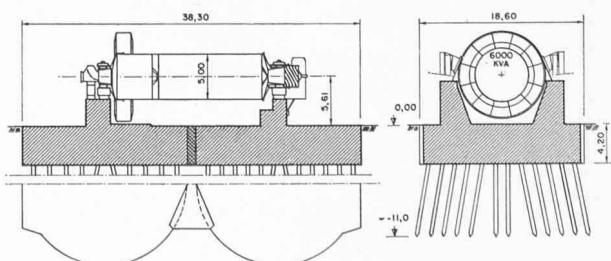


Fig. 7. — Broyeur à clinker.

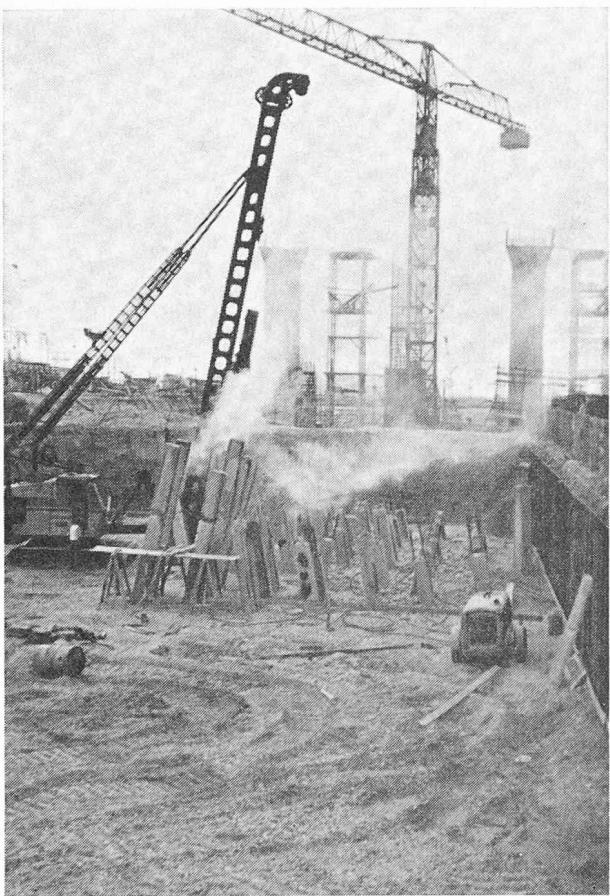


Fig. 8. — Battage des pieux sous le broyeur à clinker.

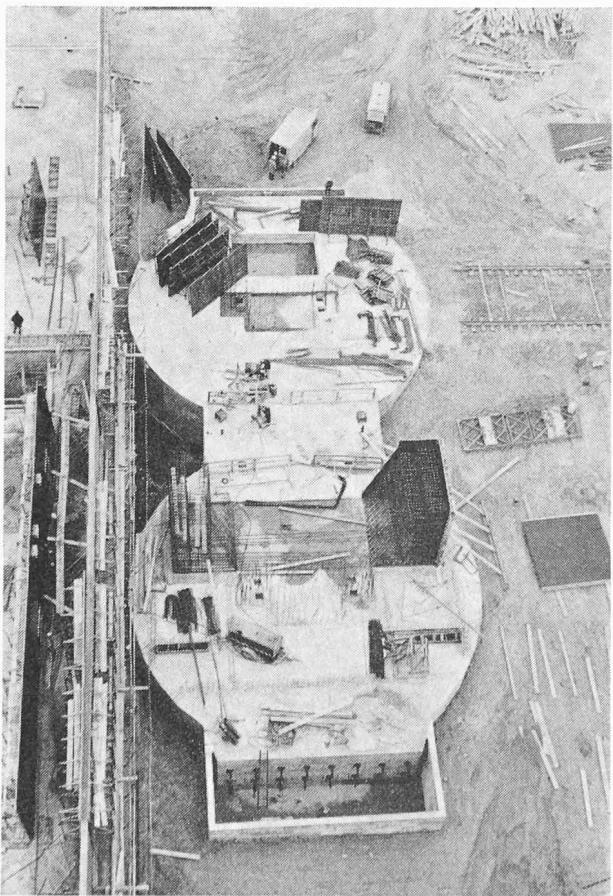


Fig. 9. — Fondation du broyeur à clinker.

par un moteur lent ceinturant le tambour à son extrémité sud. Sa capacité est de 180 t/h, sa vitesse de rotation de 13 à 15 t/min et son poids avec son contenu de 1300 t. La puissance du moteur est de 6000 kW. Il est alimenté par un cyclo-convertisseur qui transforme le courant de 50 Hz en un courant de 5,5 Hz. Ce moteur est, sauf erreur, le plus puissant au monde de ce type et a été construit par la Société Brown Boveri, à Baden.

Chaque appui du broyeur à clinker (appui moteur et appui mobile) repose par l'intermédiaire de deux massifs en superstructure réalisés en béton armé, sur deux galettes circulaires de 18,60 m de diamètre et de 4 m d'épaisseur environ, liées entre elles par une clavette de même épaisseur. Le tout est supporté par une batterie de quelque 150 pieux du même type que ceux des broyeurs du cru.

Après tassement initial, les deux galettes ont été solidarisées entre elles par précontrainte longitudinale au moyen de 16 câbles de 240 t de tension nominale et par 7 vérins plats Freyssinet placés dans le joint au milieu de la clavette ; ces vérins devaient compenser une partie des déplacements des galettes lors de la mise en précontrainte et, ainsi, éviter des efforts de cisaillement trop importants sur les pieux. Le rapport entre le poids des fondations et celui du broyeur et de son contenu est, pour ce broyeur, de 3,8 environ. La libération des espaces nécessaires aux fondations de la halle de préparation du ciment, fondations indépendantes de celles du broyeur à clinker, a été une des raisons qui ont déterminé la forme particulière de la galette de fondation du broyeur.

Après le montage du broyeur, le contact entre les galettes et le terrain a été injecté au moyen d'un coulis de ciment, ceci, comme pour les broyeurs du cru, de manière à intéresser le plus possible la masse du terrain sous les broyeurs dans l'amortissement des vibrations. De plus, sur une épaisseur de l'ordre d'un mètre, les terrains sous les deux galettes ont été substitués par une couche de gravement.

Le terrassement a nécessité l'abaissement de la nappe phréatique et le battage d'un rideau de palplanches le long des fondations du Centre de distribution de l'électricité.

4. Calcul des fondations des broyeurs

Nous n'allons pas entrer dans les détails des calculs des fondations de ces broyeurs mais, plutôt, en signaler quelques particularités.

Les vibrations induites par ces broyeurs proviennent de différentes causes qui sont en particulier :

- pour le broyeur à clinker, l'inégalité de l'entrefer entre le rotor et le stator causée par la flèche du tambour, flèche résultant elle-même d'un refroidissement inégal du tambour lors, par exemple, d'un arrêt ;
- des défauts de centrage ;
- la chute des boulets et des matériaux à broyer, à l'intérieur du tambour (voir fig. 10).

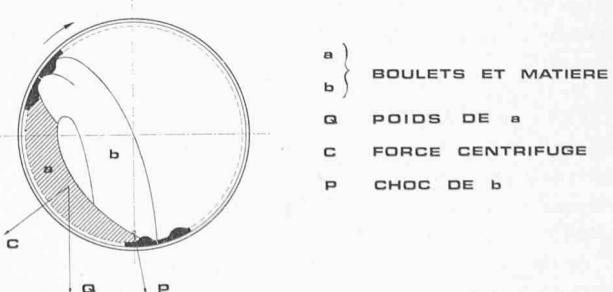


Fig. 10. — Mouvement boulets et matière dans broyeur.

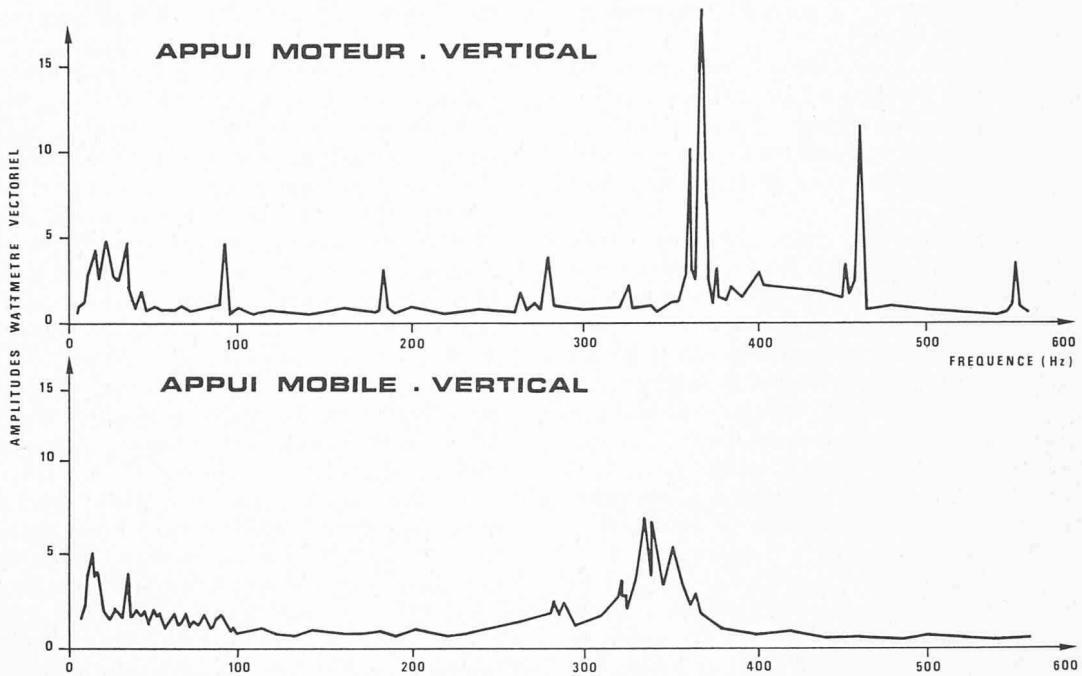


Fig. 11. — Mesure des vibrations du broyeur clinker d'Altkirch.

Les deux premières causes induisent des vibrations d'une fréquence de 0,25 Hz qui sont fort éloignées des fréquences propres verticales, horizontales et pendulaires de la fondation du broyeur, quelles que soient les hypothèses que l'on fasse sur la masse du terrain intéressé dans l'amortissement des vibrations et sur le module de réaction du sol.

La dernière cause nous a donné quelques soucis. En effet, à l'intérieur du tambour des broyeurs, les boulets et la matière à broyer sont entraînés par des redents qui, théoriquement devraient rendre périodique la chute des boulets et de la matière et provoquer des chocs d'une fréquence très voisine des fréquences propres de la fondation. Par exemple, en admettant une masse apparente du sol égale à la moitié de celle calculée par les formules de Pauw et une constante de ressort du sol équivalent de 50 000 t/cm déterminée au moyen de l'essai de pieu, qui correspond aussi selon Pauw à un sable limoneux assez dense, on obtenait pour la fondation des trois broyeurs une fréquence propre quasi égale à la fréquence de chute d'une ligne de boulets et de matière à l'intérieur du tambour. Il aurait fallu étudier alors en détail l'effet du coefficient d'amortissement et ceci n'est pas facile car, pendant la marche du broyeur, le comportement des liaisons entre sa fondation et le terrain est mal connu ; il peut, en particulier, y avoir un déchaussement qui diminue notablement la valeur de l'amortissement.

A ce sujet, il est intéressant de rappeler qu'une faible différence entre la fréquence propre et la fréquence excitatrice réduit dans une très forte proportion l'amplitude de la fondation, qui est en fait l'élément à maîtriser. Dans le cas du broyeur à clinker, en admettant à priori un amortissement nul, une fréquence propre qui diffère de 5 % de la fréquence de chute des boulets et de la matière induit une amplitude d'environ 0,2 cm, alors que pour une fréquence propre 20 % inférieure ou supérieure à la fréquence excitatrice, l'amplitude n'est plus que de 0,007 cm environ. Le diagramme bien connu $\Omega/\Omega_n = f$ (facteur d'amplification dynamique) est parfaitement significatif de ce phénomène.

En réalité, l'effet de la chute périodique des boulets et des matériaux à l'intérieur du tambour du broyeur est négligeable, comme l'ont démontré des essais entrepris en Allemagne et par nous-mêmes sur le broyeur à clinker de la Cimenterie d'Altkirch, en Alsace, dont nous parlerons plus loin. En effet, les boulets et la matière ne tombent pas en lignes parallèles, mais plutôt en une pluie continue et apériodique.

Du point de vue de la résistance du terrain, les batteries de pieux battus sous les broyeurs n'auraient pas été nécessaires. Ils ont été mis en œuvre de façon à réduire les tassements différentiels des deux paliers, fixés par les constructeurs à un maximum de 2 mm pour les broyeurs du cru et 5 mm pour le broyeur à clinker, à éviter des tassements différentiels trop importants avec les halles supportant des équipements liés aux broyeurs, elles-mêmes fondées sur des pieux semblables battus à la même profondeur, à intéresser, dans l'amortissement des vibrations verticales, un volume de terrain le plus important possible et de façon à augmenter, pour l'amortissement des vibrations horizontales et pendulaires, le moment d'inertie massique de la fondation.

5. Essais sur le broyeur à clinker d'Altkirch

Les mesures de vibrations sur le broyeur à clinker de la Cimenterie d'Altkirch ont été réalisées avec le concours du Laboratoire de géotechnique de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. Il devait permettre d'apprécier les effets de la chute des boulets et des matériaux à l'intérieur du tambour. Le broyeur à clinker d'Altkirch est un broyeur conventionnel entraîné par deux moteurs de 1400 kW chacun, tournant à environ 1000 t/min, agissant sur le tambour par l'intermédiaire d'un réducteur. Sa capacité moyenne est de 90 t/h ; il a un diamètre de 3,80 m environ, une longueur de 15 m environ et sa vitesse est de 16 t/min. Chacun de ses appuis repose sur une fondation indépendante érigée sur des pieux de 90 cm de diamètre, moulés à

quelque 25 m de profondeur. Le poids du broyeur et de son contenu est d'environ 340 t.

Nous avons placé sur chaque appui trois capteurs, un vertical, un horizontal parallèle à l'axe du broyeur, et le dernier horizontal et perpendiculaire à l'axe du broyeur. Nous avons ensuite mesuré et enregistré sur bande magnétique la vitesse des appuis, ceci pour le régime permanent et la mise en marche.

Par manque de temps et de moyens, après avoir vérifié leur faible importance au moyen du facteur d'ébranlement de Cancanni-Zeller ($k = 0,4 v^2 f$), nous avons abandonné l'analyse détaillée des vibrations horizontales.

L'étude des vibrations verticales a montré que le facteur d'ébranlement pouvait atteindre, pour l'appui moteur, 5000 mm² s⁻³ et 2000 pour l'appui mobile. Pour un bâtiment d'habitation, ces valeurs sont élevées, mais elles sont tout à fait normales pour une machine de 2800 kW.

L'étude des spectres de l'analyse harmonique des vibrations verticales nous a permis certaines constatations assez intéressantes. Signalons avant, que la fréquence propre de l'appui mobile variait de 5 à 15 Hz selon les hypothèses que l'on puisse faire sur la constante élastique du sol ou des pieux et sur la masse apparente du sol, que celle de l'appui moteur variait de 4 à 10 Hz, que la fréquence des chocs éventuels dus à la chute de la matière dans le tambour était de 10 Hz, qu'au-dessous de 6 Hz les capteurs utilisés n'étaient plus guère sensibles et, qu'enfin, l'appréciation de l'analyse harmonique était d'environ 2 Hz. Connaissant ces chiffres, on constate, sur la figure n° 11, que

pour l'appui mobile il y a bien une pointe à environ 14 Hz qui se trouve dans la bande des fréquences propres possibles et qui n'est pas très éloignée de la fréquence de chute des boulets et de la matière à l'intérieur du tambour. Le phénomène craint lors de l'étude des broyeurs du Havre existe donc peut-être dans une très faible mesure.

A l'appui moteur, il apparaît une zone de fréquence comprise entre 16 et 35 Hz, mais elle semble un peu trop éloignée des fréquences propres possibles de la fondation et de la fréquence de choc de la matière à l'intérieur du broyeur pour qu'elle en soit la conséquence ; il est cependant quand même possible qu'elle corresponde à la fréquence propre de la fondation dont les pieux réagiraient de façon différente de ceux de l'appui mobile, par exemple par la présence d'une couche plus dure à leur base ou par une meilleure qualité de leur béton ; cependant, tout cela n'est qu'hypothèse.

Dans ce spectre (vibrations verticales appui moteur), on remarque encore la fréquence de 92 Hz et ses multiples 184, 276, 368, 460, 552 qui sont certainement produites par les engrenages du réducteur ; alors que les fréquences verticales d'environ 340 et 360 Hz observées à l'appui moteur et à l'appui mobile doivent correspondre aux réflexions de l'onde de choc à l'intérieur des appuis en béton.

Adresse de l'auteur :

Michel Dysli, ingénieur EPFL-SIA
Société générale pour l'industrie,
71, av. Louis-Casaï, 1216 Cointrin/Genève

La méthode du diagramme de Nyquist dans l'auscultation des ouvrages¹

par D. BOVET, ingénieur physicien, Laboratoire de géotechnique de l'EPFL

L'auscultation dans son sens général est l'investigation d'une structure inconnue par le moyen d'une excitation provoquée dont on observe la répercussion. Dans l'auscultation médicale, ou l'auscultation sismique classique, l'excitation est un *choc*, la répercussion est un son perçu par l'oreille, ou un ébranlement capté par un sismographe.

L'excitation par choc est la plus simple à produire ; mais on peut en imaginer une infinité d'autres, par exemple l'excitation par des fonctions aléatoires ; le type dont nous nous occupons ici est l'excitation par des fonctions *sinusoïdales* de fréquence variable.

Les fonctions du temps sinusoïdales jouissent d'une propriété extrêmement importante : c'est que si l'on excite un système linéaire à propriétés constantes en un de ses points par une force sinusoïdale de fréquence donnée, tous les points du système oscilleront sinusoïdalement avec la même fréquence ; les oscillations en deux points distincts ne pourront différer que par leur *amplitude* et leur *phase* (fig. 1).

Le rapport d'amplitude et de phase existant entre deux sinusoïdes de même fréquence peut être symbolisé par un *nombre complexe* : le rapport des amplitudes est représenté par le *module*, et le déphasage par l'*argument* de ce nombre complexe. Lorsqu'en particulier l'une des sinusoïdes est une *force excitatrice P*, l'autre sinusoïde une *vitesse de déplacement observée x*, le rapport de *x* à *P* est appelé une *admittance* : admittance d'entrée si *x* est la vitesse du point d'application de *P*, admittance de transfert si *x* est la vitesse d'un autre point du système.

Supposons donc que nous soyons en présence d'un système linéaire à propriétés constantes, c'est-à-dire un système auquel puisse être appliquée la généralisation dynamique du fameux *principe de superposition* de la statique. Choisissons un point de ce système comme *point d'attaque*, ou point d'application de la force variable *P* ; et un second point du système comme point d'observation,

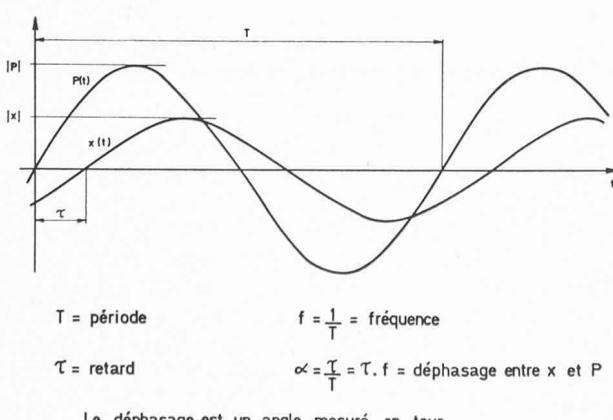


Fig. 1.

¹ Exposé présenté à la réunion d'automne 1969 de la Société suisse de mécanique des sols et des travaux de fondation (Lucerne, novembre 1969).