

Communication présentée
au Comité technique de la Société Hydrotechnique de France
le 18 juin 1965

QUELQUES APPLICATIONS DES PALIERS HYDROSTATIQUES

PAR
A. KERGOAT *

Historique

L'idée de base qui conduisit à la première réalisation de paliers hydrostatiques est aujourd'hui centenaire, puisque l'édition de 1865 du Grand Dictionnaire Universel Larousse mentionne et décrit un « palier » de ce type dont l'inventeur est M. Girard.

Le texte laisse entrevoir qu'à l'époque, l'invention dont il est question n'est connue que d'un nombre très restreint de techniciens. Quelques années plus tard, elle apparaît au grand public pour la première fois à l'Exposition Universelle de Paris de 1878 où elle revêt la forme d'une attraction appelée « le Chemin de fer de glace ».

Il semble que cette invention n'ait pas connu de grand développement à son origine, et il fallut attendre les années 30, soit plus d'un demi-siècle, pour en voir naître les premières applications industrielles à grande diffusion, et les années 50 et suivantes pour assister à une véritable ruée des scientifiques et des industriels anglo-saxons sur le sujet, et principalement dans le domaine de l'alimentation par fluide compressible, domaine que nous n'aborderons pas aujourd'hui.

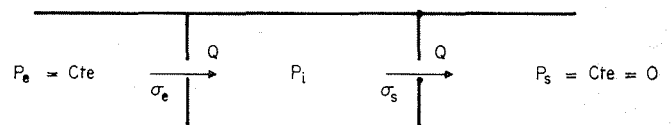
* Electricité de France. Centre de Recherches et d'Essais de Chatou.

Principe de fonctionnement des paliers hydrostatiques

Le fonctionnement d'un palier hydrostatique est basé sur le régime des pertes de charge d'un fluide s'écoulant à travers deux orifices montés en série.

Dans le cas de la figure 1, la pression aval étant constante et prise comme origine, si le fluide qui s'écoule peut être considéré comme incompressible, la relation $Q \equiv \sigma (\Delta P)^n$ (qui relie le débit en volume Q à la différence de pression P entre deux chambres séparées par un orifice, avec $n = 1$ pour un régime analogue au régime laminaire et $n = 1/2$ pour un régime analogue au régime turbulent), peut s'écrire :

$$\sigma_e (P_e - P_i)^n = \sigma_s P_i^n$$



1/

soit :

$$P_i = P_e \frac{1}{1 + (\sigma_s/\sigma_e)^{1/n}} \quad (1)$$

σ_e restant constant, si l'on diminue σ_s , c'est-à-dire si l'on étrangle l'orifice correspondant, P_i croît, et inversement.

La relation (1) montre d'autre part que :

- 1° la pression dans l'enceinte est proportionnelle à la pression d'alimentation P_e ;
- 2° les sections d'étranglement n'interviennent que par leur rapport.

Bien que ce ne soit pas tout à fait le sujet, nous devons de mentionner en passant la brillante application de ce principe : le micromètre Solex.

Une autre application connue que nous allons étudier sommairement va nous conduire plus directement au fonctionnement des paliers hydrostatiques. Il s'agit du disque d'équilibrage de la poussée axiale monté sur certaines pompes centrifuges (fig. 2).

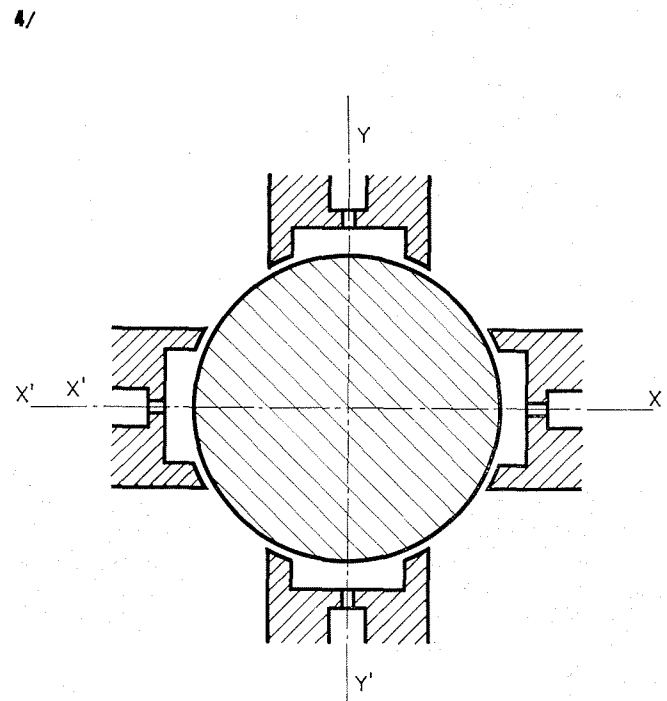
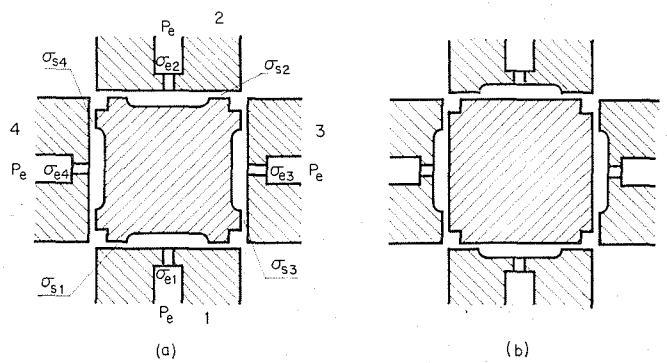
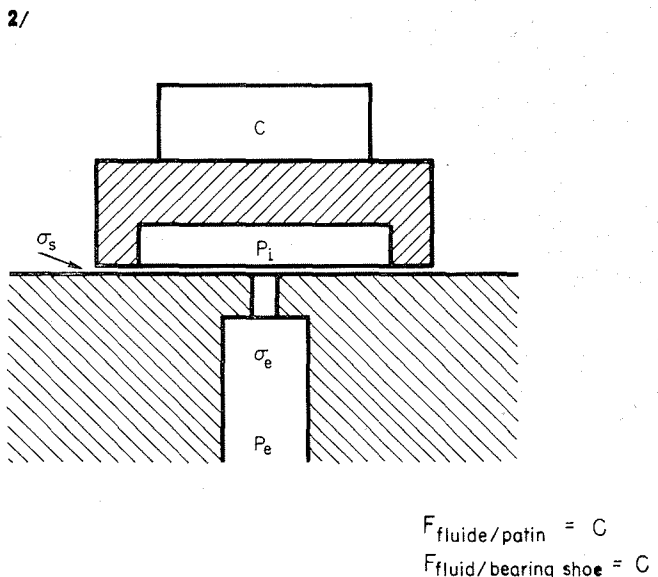
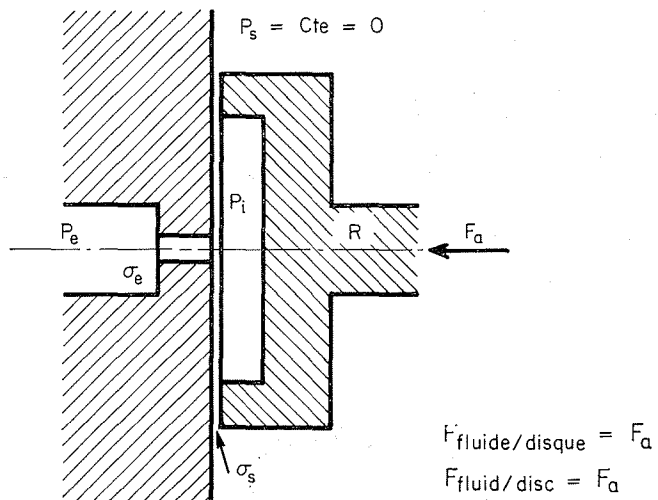
Supposons que le rotor R soit constamment sollicité vers la gauche par une poussée axiale F_a . Ména-

geons dans le rotor une chambre alimentée en fluide sous pression P_e à travers un étranglement σ_e . Le fluide s'échappe de la chambre par la périphérie. En première approximation, la section de sortie σ_s est égale au produit du périmètre de la chambre par la valeur du jeu entre le rotor et le stator. Si le jeu augmente σ_s augmente et P_i diminue. Inversement, si le jeu diminue, P_i augmente. Le rotor trouve donc une position axiale stable, telle que la force créée par l'application de la pression sur la surface du rotor soit égale et opposée à la poussée axiale F_a .

Faisons faire un quart de tour à la figure 2. En la modifiant quelque peu, nous obtenons l'image d'une charge supportée par un patin hydrostatique dont le fonctionnement est identique à celui du disque d'équilibrage (fig. 3).

Sans en rechercher pour l'instant, ni les avantages, ni les inconvénients, ajoutons un deuxième patin à la partie supérieure, puis deux patins sur les côtés (fig. 4).

L'examen de la figure montre que cette disposition présente les mêmes caractères fondamentaux que la précédente, puisque tout déplacement du mobile crée un nouveau système de force qui tend, soit à équilibrer la force supplémentaire mise en



3/

5/

jeu pour effectuer ce déplacement, soit à rappeler le mobile à sa position d'origine lorsque cette force disparaît.

Nous noterons que les deux dessins de la figure 4 sont identiques du point de vue du fonctionnement.

Nous avons raisonné jusqu'alors sur des patins dont le bord de fuite est contenu dans un plan, mais rien ne s'oppose à ce que le raisonnement soit étendu aux surfaces non planes, et en particulier, aux surfaces cylindriques de révolution.

C'est ce que montre la figure 5 et dès lors rien ne s'oppose plus à la rotation du mobile.

Le palier hydrostatique se trouve ainsi constitué, nous allons en examiner ses principales caractéristiques et les avantages qui en découlent.

Caractéristiques des paliers hydrostatiques

Les propriétés du palier hydrostatique sont conditionnées par la production de la pression extérieure d'alimentation.

FROTTEMENT : nature, évolution.

Pour un palier lisse hydrodynamique, le frottement visqueux ne peut être atteint, pour une charge donnée, qu'à partir d'une certaine vitesse de rotation, puisque la pression d'huile nécessaire au soulèvement du tourillon est développée par la rotation de celui-ci. Avec un palier hydrostatique, l'état de frottement visqueux peut être atteint à pleine charge et à vitesse nulle puisque la pression nécessaire au soulèvement de l'arbre est engendrée à l'aide d'un moyen extérieur au palier.

Comme première conséquence, il résulte que, le coefficient de frottement visqueux étant proportionnel à la vitesse, pour une vitesse de rotation nulle, le couple de frottement est théoriquement nul.

CAPACITÉ DE CHARGE.

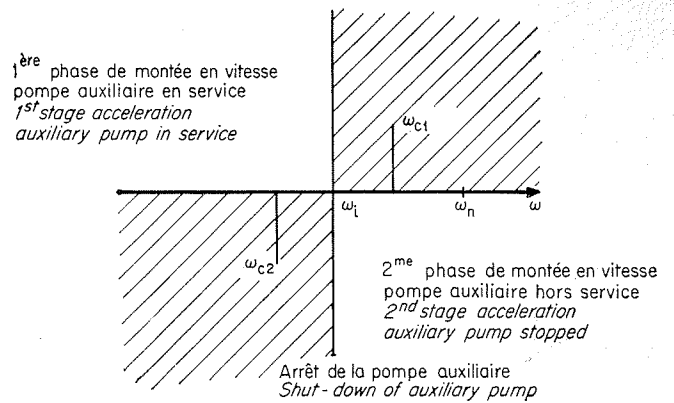
La charge utile est proportionnelle à la pression d'alimentation en huile et à la surface efficace du palier, de sorte que ces deux facteurs permettent assez de souplesse pour déterminer sa géométrie et son alimentation et ne déterminent en aucune manière une limitation quant à la charge maximale possible à supporter.

On trouve aussi bien des paliers ou patins fonctionnant sous 3 bars ou sous 150.

RAIDEUR.

La raideur est également proportionnelle à la surface du palier et à la pression d'alimentation. Elle augmente si le jeu du palier devient plus petit, mais seulement dans la mesure où certaines proportions sont respectées entre ce jeu et les étranglements à l'alimentation. Elle est, en outre, fortement affectée par le mode d'alimentation :

— étranglements constitués soit par diaphragmes, soit par tubes capillaires, mais elle est maximale lorsque l'alimentation se fait sans étranglement et, avec une pompe volumétrique par poche. La raideur, dans ce cas, croît comme le débit et l'inverse de la puissance 4 du jeu. L'avantage très important qui en découle est la faculté de pouvoir se rendre maître à volonté de cette raideur, ce qui peut être parfois appréciable pour



6/

faciliter le franchissement des vitesses critiques lors de la montée en vitesse d'un rotor. En effet, on sait que la vitesse critique d'un arbre dépend de la raideur des paliers qui le supportent et croît avec celle-ci. La figure 6 indique un processus possible de montée en vitesse d'un rotor dont la vitesse normale d'exploitation se situe au-dessus de la première vitesse critique.

La mise en service ou l'arrêt de la pompe auxiliaire détermine deux valeurs de la vitesse critique de l'arbre. Il suffit de procéder à cette opération au moment où la vitesse du rotor est comprise entre ces deux valeurs pour obtenir un effet analogue à la suppression pure et simple du franchissement de la vitesse critique.

AMORTISSEMENT INTERNE.

L'amortissement interne d'un palier hydrostatique est particulièrement important. Il est constitué par l'action de pompage qui s'exerce dans les chambres. Dans le comportement dynamique d'un tel palier, le facteur d'amortissement est proportionnel à la longueur de fuite et à l'inverse du jeu.

RÉGLAGE DE LA POSITION DE L'ARME DANS LE COUSSINET.

RAIDEUR INFINIE.

La position de l'arbre dans le coussinet est essentiellement liée aux forces extérieures auxquelles il est soumis et aux conditions d'alimentation de chacune des chambres.

Il suffit de faire varier ces dernières par un quelconque procédé (modification des étranglements, modification du débit dans le cas d'une alimentation séparée par chambre) pour que l'arbre trouve une nouvelle position d'équilibre.

On peut inversement astreindre l'arbre à occuper une position fixe lorsque les forces auxquelles il est soumis sont variables (raideur infinie).

Ces deux propriétés trouvent leur principale application dans le domaine de la machine-outil.

INDÉPENDANCE RELATIVE VIS-A-VIS DE LA NATURE DU FLUIDE.

Le principe même du fonctionnement des paliers hydrostatiques élargit la notion de graissage. Il les rend aptes à fonctionner avec n'importe quel fluide d'alimentation, puisque les qualités de viscosité ne sont pas mises en cause pour la constitution du film sustentateur.

Quelques applications des paliers hydrostatiques

Dans ce qui va suivre, nous nous sommes efforcés de décrire des applications qui illustrent, en particulier, quelques-unes des propriétés essentielles que nous venons d'énoncer.

FROTTEMENT.

Les propriétés particulièrement intéressantes du frottement que nous avons signalées ont été exploitées au Centre de Recherches et d'Essais de Chatou dans la réalisation de deux appareils :

1. Chariot pour étalonnage d'appareils de mesure de faible vitesse dans une veine fluide.

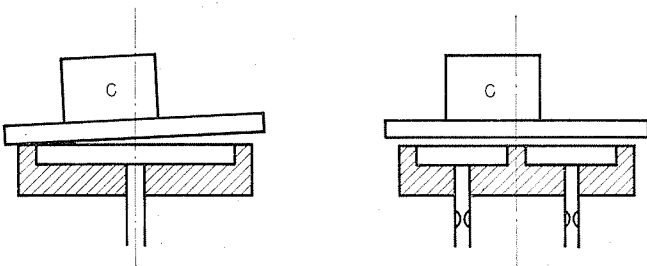
La méthode d'étalonnage qui a été choisie est la suivante :

— l'appareil à étalonner est déplacé à une vitesse connue dans une masse fluide au repos.

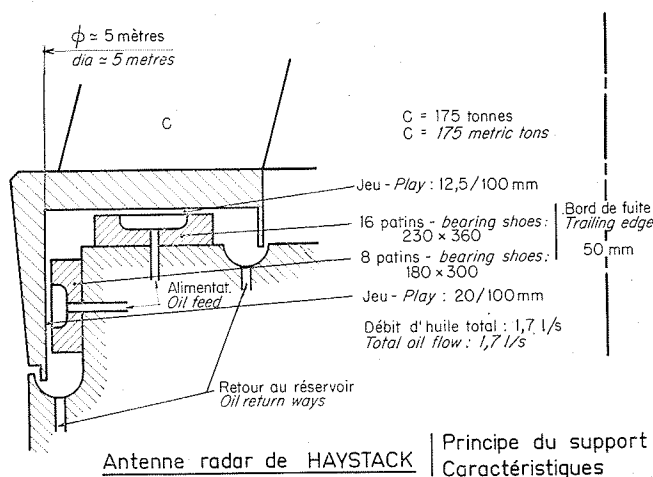
La masse à déplacer est comprise entre 200 et 250 kg et les vitesses envisagées comprises entre 0,1 et 200 mm/s.

Les vitesses les plus faibles interdisent l'adoption des moyens de guidage courants; glissement solide ou roulement, qui auraient nécessairement engendré des vibrations à basse fréquence (stick slip) insupportables pour l'utilisation envisagée.

Dans cette application, l'intérêt des patins hydrostatiques réside surtout en la nature du frottement (visqueux) créé entre les pièces en mouvement plutôt qu'en sa valeur propre.



7/



8/

2. Chariot pour la mesure des débits par la méthode de l'écran d'Anderson.

Cette méthode consiste à mesurer la vitesse de déplacement d'un écran qui obture toute la section transversale d'un canal dans lequel s'écoule le fluide dont on veut évaluer le débit.

Le guidage ainsi que les charges à véhiculer présentent les mêmes caractéristiques que dans le cas précédent, mais dans cette application, l'intérêt réside en la faible valeur de coefficient de frottement. En effet, il convient de présenter le minimum de résistance passive à l'avancement de l'écran pour ne pas altérer la mesure.

Des essais ont montré que le déplacement du chariot était perceptible pour une force appliquée de l'ordre de 0,01 N, ce qui donne un coefficient de frottement au démarrage de $4 \cdot 10^{-6}$.

A la vitesse maximale de 0,7 m/s, la force nécessaire au déplacement devient égale à 1,3 N, ce qui correspond à un coefficient de frottement inférieur à $5 \cdot 10^{-4}$, valeur encore inférieure au meilleur coefficient de roulement.

Les caractéristiques générales communes aux deux chariots sont les suivantes :

- empattement du chariot... 2,70 m;
- course du chariot... 20 m;
- charge totale à véhiculer. 250 kg;
- fluide utilisé... huile Houghton STAP 200 de viscosité 2,42° Engler à 20°;
- débit utilisé... 0,4 l/s;
- rails de guidage... cylindriques, de diamètre 50 mm.

CAPACITÉ DE CHARGE.

L'exemple que l'on peut citer, célèbre à bien d'autres titres d'ailleurs, est le télescope géant du mont Palomar.

Son poids de 500 t environ (l'équivalent de 5 locomotives à vapeur) est supporté par un ensemble de patins hydrostatiques, comportant chacun 4 chambres séparées alimentées par des orifices à restriction. Cette solution a été adoptée pour des raisons de stabilité des patins en cas d'excentrement des charges. En effet, la solution à chambre unique ne garantit pas l'absence de contact métal/métal, comme l'illustre la figure 7.

A titre indicatif, le mouvement d'horlogerie qui entraîne le télescope en rotation développe une puissance inférieure à 1/12^e de cheval.

Autre exemple : l'antenne du radar de Haystack.

Son antenne, de 40 m de diamètre, pèse 175 t et l'adoption de patins hydrostatiques pour supporter la charge et pour la guider en rotation a permis d'obtenir le pointage en azimuth avec une précision absolue meilleure que 20" d'arc et d'obtenir sans à-coups des vitesses de rotation de 1 tour par jour. La figure 8 montre le principe du support d'antenne.

On remarquera, en outre, que dans ces deux cas, on met à profit le frottement visqueux qui permet de mettre en mouvement d'énormes charges à faible vitesse sans vibrations.

RAIDEUR.

AMORTISSEMENT INTERNE.

Nous n'avons pas d'exemples particuliers pour illustrer la raideur et l'amortissement interne, mais

il faut savoir que ces deux qualités sont très précieuses dans l'application des patins hydrostatiques aux tables de machines-outils.

Les déplacements de tables perpendiculairement aux glissières entraînent des ondulations sur les faces en cours d'usinage. Or, les charges auxquelles elles sont soumises sont essentiellement variables en cours de travail. La valeur élevée de la raideur est donc une condition nécessaire à la limitation de ces déplacements.

Par ailleurs, l'amortissement interne contribue également à la réduction des ondulations. En effet, il s'avère que le coefficient d'amortissement que l'on fait apparaître dans les études du comportement dynamique des systèmes matériels — en l'occurrence, réponse en amplitude des mouvements de la table aux sollicitations de l'outil —, est ici tel que cette réponse est apériodique, donc amortit les vibrations.

Réglage de la position de l'arbre dans le coussinet — palier pilote.

Il s'agit là d'une application déjà ancienne dans le domaine de la machine-outil, mais néanmoins fort astucieuse. Ce déplacement est obtenu par la modulation des débits dans les chambres. A chaque état de débit correspond un état d'équilibre de l'arbre.

Cette propriété a été appliquée sur des rectifieuses Gendron pour la rectification des cylindres de laminoir qui doivent présenter un bombé de quelque 1/10^e de millimètre sur leur longueur.

La modulation de pression est effectuée en fonction du déplacement du chariot porte-meule.

On voit que la pénétration du tiroir P dans le corps du distributeur modifie les étranglements de deux chambres opposées, donc la valeur des débits passant dans chacune d'elles.

PALIER DE RAIDEUR INFINIE.

Dans cette application, il s'agit de maintenir en position constante un arbre dans son palier.

La figure 10 en montre le principe de réalisation. L'arbre y est représenté coupé par deux plans différents. Nous voyons qu'à tout déplacement créé par une variation de la force à laquelle il est soumis correspond une variation de pression dans l'organe détecteur. Celle-ci agissant sur les pistons du distributeur modifie les orifices d'entrée de fluide dans deux chambres opposées jusqu'à obtention de l'équilibrage de la force supplémentaire et remise à la position initiale de l'arbre ou de la table.

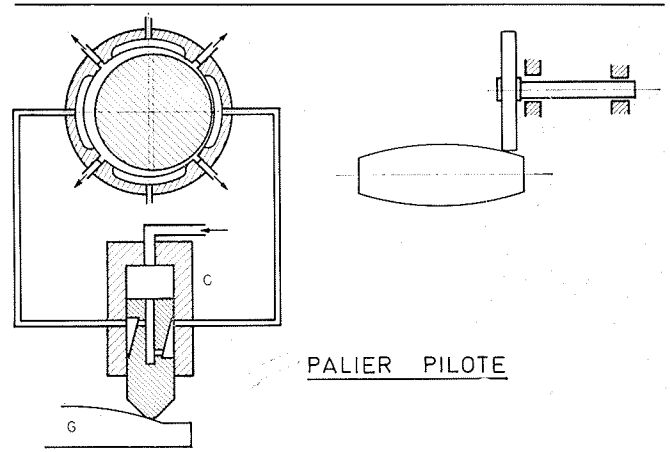
INDÉPENDANCE RELATIVE VIS-A-VIS DE LA NATURE DU FLUIDE.

Pour illustrer cette propriété, nous citerons les pompes utilisées pour véhiculer le fluide caloporteur dans les réacteurs rapides où les paliers support sont du type hydrostatique et alimentés en sodium liquide.

ORGANE D'ÉTANCHÉITÉ.

Enfin, pour terminer, nous citerons une application tout à fait spéciale en cours d'expérimentation au Centre de Recherches et d'Essais de Chatou.

Il s'agit de l'utilisation d'un palier hydrostatique, à la fois porteur et organe d'étanchéité. Il est mon-



9/ Palier pilote.
Guide bearing.

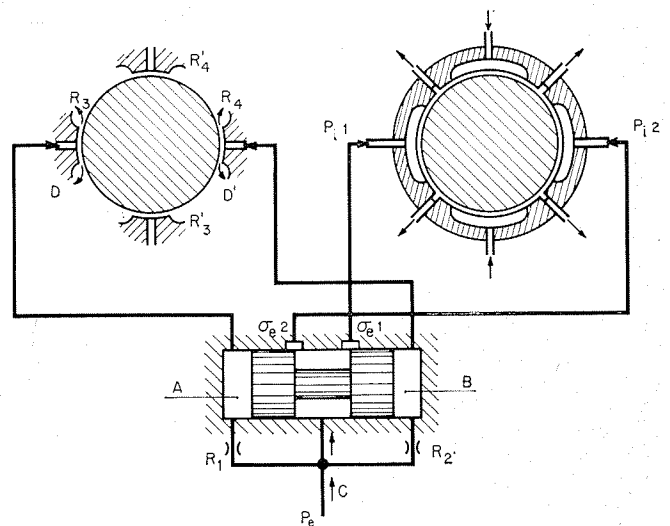
té sur une machine d'essai dans laquelle un arbre de 70 mm de diamètre tournant à 6 000 tr/mn, chargé axialement à 4 t et radialement à 1,5 t, traverse la paroi d'une enceinte sous pression à 100 bars.

Conclusions

Pour terminer cet exposé, nous ferons appel à un point particulier dont le développement pourrait élargir le champ d'application des paliers hydrostatiques, et en cela, déboucher sur d'éventuelles réalisations d'avenir.

L'état actuel de la technique fait apparaître aujourd'hui une sorte de spécialisation dans les performances limites des paliers hydrostatiques.

Les paliers à gaz semblent destinés aux faibles charges et aux grandes vitesses périphériques pouvant atteindre dans certains cas, et même dépasser, la centaine de mètres par seconde. Par contre, les



10/ Palier autocentreur.
Self-centering bearing.

paliers alimentés en fluides incompressibles qui peuvent supporter d'énormes charges ne semblent pas avoir été utilisés jusqu'ici à des vitesses périphériques dépassant 35 m/s. On peut se demander si, pour ce dernier type de palier, le moment n'est pas venu de pousser les investigations au-delà de ces vitesses.

En effet, les limitations rencontrées dans la lubrification des grandes unités tournantes, toujours plus largement dimensionnées, où les vitesses périphériques atteignent déjà des valeurs de l'ordre de 80 à 90 m/s et les charges par coussinet, plusieurs dizaines de tonnes, rendent nécessaire de prévoir un relais au graissage hydrodynamique dans sa conception actuelle. Il est permis de se demander si la solution hydrostatique n'a pas quelques chances d'assurer ce relais?

Références bibliographiques

- ROHS (H.G.). — Le palier hydrostatique dans la construction mécanique. *Industrie Anzeiger*, n° 80, octobre 1962.
- GÉRARD (R.). — Le palier fluide. *Mémoires des Ingénieurs Civils de France*, janvier-février 1949.
- TOURASSE (M.). — Le palier fluide. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, février 1961.
- DUDLEY (D. FULLER). — Hydrostatic Lubrication. *Machine Design*, juin 1947.
- GEORGE (R. CARROLL). — A Hydrostatic Bearing for Hays-tack, janvier 1963.
- KERGOAT (A.). — Chariot à patins fluides. *Bulletin du Centre de Recherches et d'Essais de Chatou*, n° 3, 1963.

Discussion

Président : M. BANAL

M. le Président remercie M. KERGOAT de son intéressant exposé et des perspectives qu'il apporte dans le domaine des machines tournantes.

M. COMOLET remarque que les paliers hydrostatiques fournissent une bonne lubrification à basse vitesse de rotation.

A grande vitesse, des phénomènes d'inertie peuvent modifier la répartition des pressions prévues dans un calcul hydrostatique et conduire à des instabilités, comme cela est courant dans le cas des paliers à gaz. M. COMOLET demande à M. KERGOAT si de tels problèmes d'instabilité se sont posés dans le cas des arbres tournant à grande vitesse essayés à Chatou.

M. KERGOAT indique que ce problème ne s'est pas posé dans le cas étudié d'une butée de 140 mm de diamètre, qui conduit à des vitesses de l'ordre de 35 m/s.

M. COMOLET dit que la rotation de l'engin produit, par endroits, un effet de force centrifuge et, par conséquent, des variations de pression qui ne sont pas tellement régies par les lois de l'hydrostatique.

M. KERGOAT indique que l'effet de la force centrifuge a été pris en compte, mais intervient peu dans son problème qui concerne un arbre de 70 mm et une butée double de 140 mm, où l'on est conduit à des pressions d'utilisation à l'équilibre de 50 kg/cm².

M. RÉMÉNÉRAS demande si l'on connaît le comportement des paliers hydrostatiques lorsque leur charge radiale varie rapidement et d'une façon pseudo-périodique en fonction du temps, comme dans un moteur à explosion. Par exemple,

a-t-on fait des expériences précisant le fonctionnement des divers dispositifs d'auto-centrage dans ces conditions particulières?

M. KERGOAT n'en a pas connaissance. En fait, ce mécanisme d'autocentrage est utilisé sur les machines-outils, notamment sur les rectifieuses.

M. KERGOAT ignore comment répondrait, dans ce cas, le système d'autocentrage.

M. RÉMÉNÉRAS pense que certains types de machines mettent en jeu des efforts d'inertie très brutaux, pour lesquels les systèmes décrits ne présenteraient pas une sécurité suffisante.

M. KERGOAT répond que c'est vraisemblable, mais qu'étant donné que l'on est maître de la raideur d'un palier hydrostatique ordinaire (il suffit d'augmenter ou de diminuer les débits pour faire varier la raideur), il est préférable de différer l'emploi d'un palier autocentreur pour une application dynamique.

M. MARCHAL estime que l'application, citée par M. KERGOAT, est très intéressante, mais un peu particulière. En effet, si, au moment où la meule attaque, elle recule un peu et que le mécanisme se remette en place, le recul momentané n'est pas gênant. Par contre, pour une roue de compresseur ayant un jeu radial très petit, ce phénomène est plus grave, car on courrait un risque d'accident.

M. le Président demande si, pour calculer la période propre dans un système tournant de cette disposition, il faut

prendre la raideur du dispositif seul ou la raideur tenant compte de cette autocorrection.

M. KERGOAT pense qu'il faut tenir compte de cette autocorrection, dont la présence est d'ailleurs une complication si l'on veut faire une étude dynamique et si l'on veut aller assez haut en fréquence. Puisqu'on est maître de la raideur du palier, il suffit d'avoir la bonne pression ou le bon débit pour que la raideur soit telle que l'élongation radiale soit compatible avec le fonctionnement de la machine.

M. le Président se demande si, comme dans les calculs anciens de régulation, on peut séparer la réaction immédiate du rythme et sa lente remise en place sous un effort continu d'après le système compensé indiqué par M. KERGOAT. Est-ce aussi simple dans la réalité?

M. KERGOAT précise que, dans l'étude dynamique, ce n'est pas aussi simple, parce qu'il faut tenir compte des masses en mouvement, des masses mécaniques et de l'écoulement des fluides qui peuvent provoquer des perturbations.

M. DENIS demande ce qui se passe en cas de panne de la pompe d'alimentation.

M. KERGOAT indique que c'est fort ennuyeux si l'on ne prend aucune précaution, mais que les constructeurs savent maintenant faire du matériel qu'ils peuvent garantir pour 100 000 heures et certains ont depuis trente ans du matériel qui engendre un débit d'huile à une pression de 100 bars.

Sur une remarque de M. MARCHAL, M. le Président observe que si la pompe à huile tombe en panne, la catastrophe n'est pas obligatoirement instantanée et M. RÉMÉNIÉRAS ajoute que l'on peut toujours mettre un accumulateur qui permettrait l'arrêt.

M. COMOLET indique que l'on conçoit et que l'on réalise aussi des paliers hydrostatiques sans chambre; l'alimentation se fait au centre de la plaque et la distribution des

pressions est différente. Il semble que ces paliers permettent d'avoir des raideurs plus grandes, parce que les jeux axiaux sont beaucoup plus petits pour les mêmes débits. M. KERGOAT a-t-il une expérience dans ce domaine?

M. KERGOAT précise que les paliers sans chambre ont une capacité de charge moindre que les paliers à chambre; en revanche, à pression égale, ils débitent moins.

Les jeux peuvent être du même ordre de grandeur. L'arbre dont M. KERGOAT a parlé, qui tourne à 6 000 tours et qui fait 70 mm de diamètre, a un jeu de $1/10^{\circ}$ de mm au rayon. C'est déjà un jeu important car on cherchait à perdre le minimum de puissance pour l'entraînement en rotation. Il y avait là un problème d'approvisionnement; il fallait trouver chez les constructeurs un moteur d'entraînement, dont l'ensemble des caractéristiques s'accommodait peu des puissances assez élevées.

M. CHEVALIER a cru comprendre, dans ce que M. KERGOAT a dit, que le fait d'avoir une indépendance dans l'alimentation des chambres, est un élément certainement favorable. Est-ce bien cela ou est-ce le fait d'avoir une pompe d'alimentation par chambre ou d'avoir un système de diaphragme permettant, à partir d'une seule alimentation, de régler la pression ou le débit dans chacune des chambres?

M. KERGOAT expose le problème et précise que l'indépendance dans l'alimentation à débit constant des chambres est bien un facteur favorable à la raideur. En contrepartie, les besoins en matériel de pompage sont plus élevés, mais les frais d'investissement supplémentaires peuvent dans certain cas être compensés par l'économie de puissance de pompage qu'un tel dispositif permet en outre de réaliser.

M. le Président remercie M. KERGOAT de son exposé et des réponses qu'il a fournies aux diverses questions qui lui ont été posées.