

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
COURBEVOIE

①1 N° de publication :  
(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

3 033 609

②1 N° d'enregistrement national : 15 00460

⑤1 Int Cl<sup>8</sup> : F 16 C 32/06 (2016.01)

⑫

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

⑫② Date de dépôt : 09.03.15.

⑫③ Priorité :

⑫④ Date de mise à la disposition du public de la  
demande : 16.09.16 Bulletin 16/37.

⑫⑤ Liste des documents cités dans le rapport de  
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du  
présent fascicule*

⑫⑥ Références à d'autres documents nationaux  
apparentés :

Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : GRINGOZ YVES — FR.

⑦② Inventeur(s) : GRINGOZ YVES.

⑦③ Titulaire(s) : GRINGOZ YVES.

⑦④ Mandataire(s) : GRINGOZ YVES.

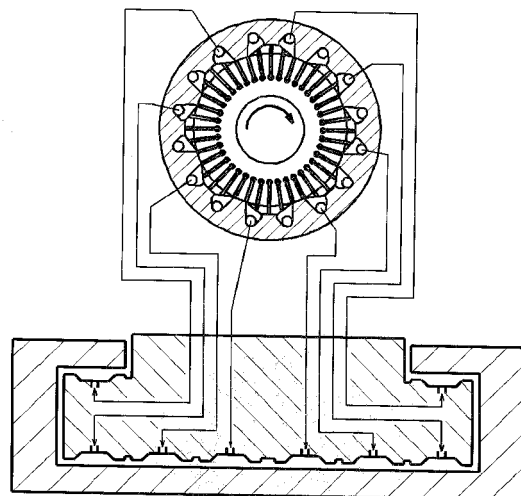
⑤④ GUIDAGE HYDROSTATIQUE A REPORT DE PRESSION.

⑤⑦ La présente invention concerne un principe de  
conception des liaisons hydrostatiques. Elle repose à la fois  
sur la manière de disposer les alvéoles, et sur la manière de  
les alimenter.

Les alvéoles formant chaque liaison sont disposées  
pour que leurs efforts s'opposent et s'équilibrent sur le so-  
lide à guider, qu'elles sont alimentées chacune par un mo-  
teur/pompe volumétrique et réversible, et que les rotors de  
ces moteur/pompes soient tous accouplés.

Cela nous met en situation de conservation de la puis-  
sance hydraulique: lors de l'application d'un effort, la pres-  
sion baisse dans les alvéoles déchargées pour se reporter  
vers les alvéoles chargées. La rigidité est améliorée et il  
devient possible d'opposer des surfaces hydrauliques de taille  
différentes. La position est réglable après installation.

Des pompes à palettes à refoulements multiples per-  
mettent d'avoir une multitude de moteur/pompes sous faible  
encombrement.



FR 3 033 609 - A1



## **Guidage hydrostatique à report de pression**

La présente invention concerne un principe de conception des guidages hydrostatiques. Elle repose à la fois sur la manière de disposer les alvéoles, et sur la manière  
5 de les alimenter.

Malgré leur rigidité et leur capacité d'amortissement, les guidages hydrostatiques sont peu utilisés dans les machines outils. Cela parce que leurs modes d'alimentation actuels limitent leur possibilité.

10 La force d'une alvéole est proportionnelle à sa surface : dans le cas de liaisons préchargées, il faut actuellement opposer deux surfaces équivalentes. Dans le cas d'une glissière, la surface des alvéoles vient en concurrence avec la surface utile des ensembles guidés.

Les paliers n'ont pas ce problème. Par contre, la vitesse d'une broche est limitée par  
15 le freinage hydraulique dans les paliers. C'est le facteur limitant le plus contraignant.

Le principe d'alimentation le plus simple est l'alimentation à pression constante. Il repose sur des résistances hydraulique, qui provoquent un échauffement du fluide variable en fonction de la charge. Une modification de comportement du guidage, même infime, limite le niveau de précision des usinages.

20 L'autre principe actuellement connu est l'alimentation à débit constant. Le mécanisme permettant d'assurer un débit constant doit être embarqué sur le sous ensemble qui porte les alvéoles. Au delà du cout, cela pose la question de l'encombrement.

La présente invention vise à supprimer ces limites. Elle repose sur le fait que les  
25 alvéoles formant la liaison, disposées de telle sorte que leurs efforts s'opposent et s'équilibrent pour maintenir un sous-ensemble en suspension, sont alimentées chacune par un moteur/pompe volumétrique et réversible, et que les rotors de ces moteur/pompes soient tous accouplés mécaniquement.

Dans ces conditions, il y a conservation de la puissance hydraulique. L'application  
30 d'un effort provoque une augmentation du jeu de fonctionnement des alvéoles ne s'opposant pas à l'effort : nous parlerons d'alvéole « déchargées ». Mais l'accouplement des pompes empêche le débit de ces alvéoles d'augmenter. La pression baisse donc et les pompes

d'alimentation deviennent motrices : elle entraîne les pompes des alvéoles chargées. On a alors un report de la pression depuis les alvéoles déchargées vers les alvéoles chargées.

Les pompes, réversibles, n'ont pas à être motorisées. Elles sont entraînées par le passage de l'huile. Par contre le débit et la pression d'alimentation sont liés, ce qui implique un circuit d'alimentation en fluide indéformable en aval des pompes. Cela impose de fixer les pompes sur le sous-ensemble portant les alvéoles. Les problèmes d'encombrements sont résolus en utilisant des pompes à palette comportant plusieurs aspirations et refoulements indépendants, sur le principe des pompes à palettes « équilibrées ». On a ainsi, dans un corps unique, une multitude de moteur/pompes volumétriques, réversibles, et dont les rotors sont accouplés en rotations.

Les caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description détaillée. Nous y avons adjoint des figures dans le but de faciliter la compréhension et fournir des exemples. Ces figures n'ont en aucun cas un caractère limitatif.

Chaque graphique est issu des données d'un tableau de données inséré dans la description.

La figure 1.1 est un schéma de principe d'une butée hydrostatique à report de pression. Elle sert de support à l'étude de la première partie.

Les figures 1.2 et 1.3 sont issues des données du tableau 1.1. Le cas d'étude est une butée symétrique.

La figure 1.2 présente les lois de comportement ainsi que l'évolution des débits.

La figure 1.3 présente les courbes de raideur.

Les figures 1.4 et 1.5 sont issues des données du tableau 1.2. Le cas d'étude est une butée opposant un nombre variable d'alvéoles de surface égales.

La figure 1.4 présente les lois de comportement ainsi que l'évolution des débits.

La figure 1.5 présente les courbes de raideur.

La figure 1.6 présente les lois de comportement d'une butée opposant un nombre égales d'alvéoles de surface différentes. Les données sont issues du tableau 1.4.

Les figures 1.7 et 1.8 sont issues des données du tableau 1.5. Le cas d'étude est une butée symétrique dont les alvéoles d'une face reçoivent un débit différent de ceux en vis-à-vis.

La figure 1.7 présente les lois de comportement ainsi que l'évolution des débits.

La figure 1.8 présente les courbes de raideur.

Les figures 1.9 et 1.10 sont issues des données du tableau 1.6. Le cas d'étude est une butée dont les écoulements en sortie d'alvéole sont différents.

5 La figure 1.9 présente les lois de comportement ainsi que l'évolution des débits.

La figure 1.10 présente les courbes de raideur.

La figure 1.11 est un schéma de principe de l'installation permettant régler la position de fonctionnement après mise en service.

10 La figure 2.1 est un schéma de principe de la connexion de deux liaisons à report de pression. Elle sert de support à l'étude de la seconde partie.

La figure 2.2 est issue des données du tableau 2.1. Elle montre l'effet de la connexion de deux butées à report de pression.

15 La figure 2.3 est issue des données du tableau 2.2. Elle montre l'effet de la mise sous charge d'une butée sur la butée qui lui est connectée.

La figure 2.4 est issue des données du tableau 2.3. Elle montre l'effet d'une variation d'alimentation entre liaison connectées.

20 La figure 3.1 est une vue en coupe d'un exemple de pompe à palette à refoulements multiples.

La figure 3.2 est un détail de la figure 3.1.

La figure 3.3 est une vue en coupe d'un exemple de pompe à palette à refoulements multiples, ou chaque admission alimente plusieurs refoulements.

La figure 3.4 est un détail de la figure 3.3.

25 La figure 3.5 est un schéma d'utilisation d'une pompe à palette à refoulement multiples.

La figure 3.6 est un schéma d'asservissement du débit.

## 1 Étude d'une butée à double effet

### 1.1 Cadre d'étude

#### 1.1.1 Système étudié

Cette partie a pour but de mettre en place les caractéristiques fondamentales des liaisons à report de pression.

Nous nous appuyons sur la *figure 1.1* qui représente un sous-ensemble guidé par rapport à un autre au moyen d'une butée hydrostatique à double effet. Un repère est lié au sous ensemble guidé, situé à mi hauteur. Un autre est lié au sous ensemble fixe, situé à mi hauteur du logement.

Les alvéoles de la face supérieures sont toutes sur le même modèle. Elles sont en nombre variable. De même, les alvéoles de la face inférieure sont toutes sur le même modèle, pas nécessairement celui des alvéoles supérieures. Elles sont également en nombre variable.

Chaque alvéole est alimentée indépendamment des autres par une pompe volumétrique réversibles. Les rotors de toutes les pompes sont accouplées en rotation. Les pompes alimentant les alvéoles supérieures sont identiques au niveau du rendement et de la cylindrée. De même pour celles alimentant les alvéoles inférieures.

Nous avons inséré un clapet de non-retour en tête de la batterie de pompes. Il suffit à empêcher tout retour du fluide dans toutes les lignes avales. En effet, les pompes sont volumétriques : un retour signifie l'inversion du sens de rotation. Du fait de l'accouplement des pompes en rotation, un seul clapet de non-retour sur l'alimentation centralisée bloque la totalité des lignes.

Nous faisons l'hypothèse de l'absence de moment fléchissant : la réaction à la pression des alvéoles supérieures, la réaction à la pression des alvéoles inférieures et les efforts appliqués au sous ensemble guidé sont appliqués sur un même axe vertical.

Afin de s'affranchir des effets de bord, nous considérons une butée infiniment longues : les calculs seront faits pour une longueur ( $L$ ) de butée.

Puisque chaque alvéole est alimentée par une pompe, le rendement de ces pompes intervient dans le fonctionnement de la liaison pour réduire le phénomène de report de

pression. Cette donnée est d'autant plus importante que le rendement d'une pompe hydraulique varie en fonction de la pression de refoulement. Cependant, c'est une donnée technologique qui nous est inaccessible : nous avons choisi une valeur réaliste de rendement.

- 5
- Le rendement varie proportionnellement à la différence de pression entre admission et refoulement
  - le rendement d'une pompe est de 0,9 lorsque cette différence est nulle
  - il est de 0,8 lorsque la différence est maximale

10 Au vu de nos hypothèses, nous sommes en présence d'une butée hydrostatique à report de pression : les efforts des alvéoles s'opposent et s'équilibrent, chacune est alimentée par une pompe volumétrique réversible et toutes les pompes sont accouplées en rotation.

La cylindrée des pompes implique que toutes les alvéoles supérieures reçoivent le même débit. En l'absence de rotation, elles ont le même jeu de fonctionnement. Puisqu'elles ont les mêmes dimensions, cela fait qu'elles ont la même pression de fonctionnement.

15 De même, les alvéoles inférieures sont alimentées par le même débit et ont la même pression de fonctionnement.

### 1.1.2 Équations

#### Alvéoles supérieures :

Largeur totale :	$l_1$	cylindrée des pompes :	$cy_1$
largeur de seuil :	$b_1$	rendement :	$\eta_1$
5 Longueur	$L$	pression d'alimentation :	$P_1$
Épaisseur du film d'huile :	$h_1$	Débit d'alimentation :	$Q_1$
Réaction du bâti à la pression des alvéoles : $W_1$			
nombre d'alvéoles	$n_1$		

#### 10 Alvéoles inférieures :

Largeur totale :	$l_2$	cylindrée des pompes :	$cy_2$
largeur de seuil :	$b_2$	rendement :	$\eta_2$
Longueur	$L$	pression d'alimentation :	$P_2$
Épaisseur du film d'huile :	$h_2$	Débit d'alimentation :	$Q_2$
15 Réaction du bâti à la pression des alvéoles :	$W_2$		
nombre d'alvéoles	$n_2$		

#### Données générales

Pression centralisée	$P$	Débit général	$Q$
20 Vitesse des pompes	$N$	Viscosité du fluide	$\mu$
Effort extérieur	$F$	Position verticale	$y$
Jeu total de guidage :	$J$	$(J = h_1 + h_2)$	

équilibre mécanique  $F - W_1 + W_2 = 0 \Leftrightarrow F = W_1 - W_2$  (1.1)

25 conservation de la puissance  $PQ = \frac{n_1}{\eta_1} P_1 Q_1 + \frac{n_2}{\eta_2} P_2 Q_2$  (1.2)

conservation du débit  $Q = n_1 Q_1 + n_2 Q_2$  (1.3)

Charge supportée par 1 butée  $W = \iint_S p(x) dS$

Soit  $W_1 = n_1 P_1 L(l_1 - b_1)$  et  $W_2 = n_2 P_2 L(l_2 - b_2)$  (1.4)

Vitesse d'écoulement du fluide  $u = \frac{1}{2\mu} y(y-h) \frac{dp}{dx}$

5 débit volumique  $Q_1 = 2L \int_0^{h_1} u(x=0) dy$

soit  $Q_1 = \frac{P_1 h_1^3 L}{6\mu b_1}$  et  $Q_2 = \frac{P_2 h_2^3 L}{6\mu b_2}$  (1.5)

Avec ( $\mu$ ) la viscosité dynamique du fluide employé.

Débit des pompes  $Q_1 = cy_1 N$  et  $Q_2 = cy_2 N$

10 Soit  $\frac{Q_1}{cy_1} = \frac{Q_2}{cy_2}$  (1.6)

Position du repère  $h_1 = J/2 - y$  et  $h_2 = J/2 + y$  (1.7)

### 15 1.1.3 Résolution

On commence par exprimer ( $Q_2$ ) en fonction de ( $Q_1$ ) et ( $P_2$ ) en fonction de ( $P_1$ ). On peut alors exprimer ( $P_1$ ) en fonction de ( $y$ ), grâce à l'équation (1.2). On peut alors déduire ( $P_2$ ). En remplaçant dans la relation (1.1), on obtient ( $F$ ) en fonction de ( $y$ ). Parallèlement, on a accès aux débits ( $Q_1$ ) et ( $Q_2$ ).

### 20 Loi de comportement de la butée

(1.6) dans (1.5)  $\frac{P_1 h_1^3}{cy_1 b_1} = \frac{P_2 h_2^3}{cy_2 b_2}$

$$\Leftrightarrow P_2 = P_1 \frac{h_1^3 cy_2 b_2}{h_2^3 cy_1 b_1} \quad (1.8)$$

(1.5) & (1.6) dans (1.3)  $Q = \frac{P_1 h_1^3 L}{6\mu b_1} (n_1 + n_2 \frac{cy_2}{cy_1})$  (1.9)

(1.5), (1.6), (1.8) & (1.9) dans (1.2)

$$P(n_1 + n_2 \frac{cy_2}{cy_1}) = P_1 \frac{\eta_2 n_1 b_1 cy_1^2 h_2^3 + \eta_1 n_2 b_2 cy_2^2 h_1^3}{\eta_1 \eta_2 b_1 cy_1^2 h_2^3}$$

$$\Leftrightarrow P_1 = P(n_1 cy_1 + n_2 cy_2) \frac{\eta_1 \eta_2 b_1 cy_1 h_2^3}{\eta_2 n_1 b_1 cy_1^2 h_2^3 + \eta_1 n_2 b_2 cy_2^2 h_1^3} \quad (1.10)$$

$$(1.8) \text{ dans } (1.10) \quad P_2 = P(n_1 cy_1 + n_2 cy_2) \frac{\eta_1 \eta_2 b_2 cy_2 h_1^3}{\eta_2 n_1 b_1 cy_1^2 h_2^3 + \eta_1 n_2 b_2 cy_2^2 h_1^3} \quad (1.11)$$

(1.4), (1.10) & (1.11) dans (1.1)

$$5 \quad F = PL \eta_1 \eta_2 (n_1 cy_1 + n_2 cy_2) \frac{n_1 b_1 cy_1 h_2^3 (l_1 - b_1) - n_2 b_2 cy_2 h_1^3 (l_2 - b_2)}{\eta_2 n_1 b_1 cy_1^2 h_2^3 + \eta_1 n_2 b_2 cy_2^2 h_1^3} \quad (1.12)$$

(1.7) dans (1.12)

$$F = PL \eta_1 \eta_2 (n_1 cy_1 + n_2 cy_2) \frac{n_1 b_1 cy_1 (\frac{J}{2} + y)^3 (l_1 - b_1) - n_2 b_2 cy_2 (\frac{J}{2} - y)^3 (l_2 - b_2)}{\eta_2 n_1 b_1 cy_1^2 (\frac{J}{2} + y)^3 + \eta_1 n_2 b_2 cy_2^2 (\frac{J}{2} - y)^3} \quad (1.13)$$

### Débit de la butée

- 10 Le débit est un élément majeur du fonctionnement d'une liaison hydrostatique. Le principe du report de pression repose sur une diminution de débit, ce qui laisse prévoir des problèmes de cavitation et de d'infiltration d'air.

(1.10) & (1.7) dans (1.5)

$$Q_1 = \frac{PL(n_1 cy_1 + n_2 cy_2)}{6\mu} \frac{\eta_1 \eta_2 cy_1 (\frac{J}{2} - y)^3 (\frac{J}{2} + y)^3}{\eta_2 n_1 b_1 cy_1^2 (\frac{J}{2} + y)^3 + \eta_1 n_2 b_2 cy_2^2 (\frac{J}{2} - y)^3} \quad (1.14)$$

- 15 Au besoin, (Q) et (Q<sub>2</sub>) seront déduits de (Q<sub>1</sub>) au moyen de la relation (1.6)

### **1.1.4 Convention d'écriture**

Dans la suite de ce chapitre, nous étudierons l'influence de chaque paramètre en n'en faisant varier qu'un à la fois. Les relations (1.13) et (1.14) se simplifieront. Pour une

meilleure clarté, (F) et (Q<sub>1</sub>) seront affectés d'un indice rappelant le paramètre étudié. Par exemple, (F<sub>cy</sub>) et (Q<sub>1cy</sub>) si on étudie la variation de (cy<sub>2</sub>) par rapport à (cy<sub>1</sub>).

Les termes fixes de l'équation seront simplifiés : nous poserons systématiquement (F'), avec  $F' = F/f$ , « f » désignant le terme non variable de l'équation.

- 5 Nous ne nous intéresserons qu'à l'évolution du débit, non à sa valeur : nous poserons systématiquement  $Q' = Q_1/C$ , ou (C) remplace le terme fixe et sera fixé arbitrairement en fonction de la lisibilité des graphiques. (Q') et (C) seront affectés du même indice que (Q<sub>1</sub>).

La raideur de la butée sera obtenue par dérivation numérique de la loi de comportement simplifiée « F' ». Elle sera notée (R'), et sera affectée du même indice que (F').

10 (F').

Au vu de leur définition, nous notons que (F'), (Q') et (R') sont sans dimension.

### **1.2 Oppositions de 2 ensembles d'alvéoles égaux**

Les alvéoles supérieures et inférieures sont égaux en nombre et en dimension. Les pompes d'alimentations sont toutes de même modèle.

- 15 On a alors  $n_1 = n_2$        $b_1 = b_2$        $l_1 = l_2$        $cy_1 = cy_2$

La relation (1.13) se simplifie en :

$$F = 2 n_1 P L \eta_1 \eta_2 (l_1 - b_1) \frac{\left(\frac{J}{2} + y\right)^3 - \left(\frac{J}{2} - y\right)^3}{\eta_2 \left(\frac{J}{2} + y\right)^3 + \eta_1 \left(\frac{J}{2} - y\right)^3}$$

$$F' = \frac{F}{n_1 P L (l_1 - b_1)}$$

$$F' = 2 \eta_1 \eta_2 \frac{\left(\frac{J}{2} + y\right)^3 - \left(\frac{J}{2} - y\right)^3}{\eta_2 \left(\frac{J}{2} + y\right)^3 + \eta_1 \left(\frac{J}{2} - y\right)^3} \quad (1.15)$$

20

La relation (1.14) se simplifie en :

$$Q_1 = \frac{2PL}{6\mu b_1} \frac{\eta_1 \eta_2 \left(\frac{J}{2} - y\right)^3 \left(\frac{J}{2} + y\right)^3}{\eta_2 \left(\frac{J}{2} + y\right)^3 + \eta_1 \left(\frac{J}{2} - y\right)^3} \quad (1.16)$$

$$Q' = C \frac{\eta_1 \eta_2 \left(\frac{J}{2} - y\right)^3 \left(\frac{J}{2} + y\right)^3}{\eta_2 \left(\frac{J}{2} + y\right)^3 + \eta_1 \left(\frac{J}{2} - y\right)^3} \quad (1.17)$$

Nous souhaitons faire la comparaison avec une butée alimentée à pression constante. On conserve la configuration matérielle en remplaçant les pompes par des résistances hydrauliques. On obtient :

$$F'_{(p=cst)} = K \frac{\left(\frac{J}{2} + y\right)^3 - \left(\frac{J}{2} - y\right)^3}{\left[1 + K \left(\frac{J}{2} + y\right)^3\right] \left[1 + K \left(\frac{J}{2} - y\right)^3\right]} \quad (1.18)$$

où (K) est la constante de raideur des résistances hydrauliques.

Tableau 1.1

y	F'	Q'	R'	F'(\eta=1)	R'(\eta=1)	F'(P=cst)	R'(p=cst)
-J/2	-1,6	0	0	-2	0	-0,833	0
-0,45	-1,6	0,002	0,096	-1,999	0,137	-0,81	1,34
-0,4	-1,596	0,02	0,373	-1,995	0,532	-0,78	1,812
-0,35	-1,585	0,067	0,986	-1,978	1,401	-0,738	2,478
-0,3	-1,557	0,158	2,142	-1,938	3,025	-0,681	3,295
-0,25	-1,499	0,304	4,133	-1,857	5,759	-0,606	4,198
-0,2	-1,391	0,51	7,292	-1,708	9,933	-0,513	5,096
-0,15	-1,207	0,767	11,83	-1,46	15,56	-0,402	5,898
-0,1	-0,918	1,044	17,46	-1,086	21,884	-0,277	6,525
-0,05	-0,509	1,282	22,96	-0,584	27,143	-0,141	6,92
0	0	1,406	25,45	0	29,223	0	7,055
0,05	0,509	1,282	22,96	0,584	27,143	0,141	6,92
0,1	0,918	1,044	17,46	1,086	21,884	0,277	6,525
0,15	1,207	0,767	11,83	1,46	15,56	0,402	5,898
0,2	1,391	0,51	7,292	1,708	9,933	0,513	5,096
0,25	1,499	0,304	4,133	1,857	5,759	0,606	4,198
0,3	1,557	0,158	2,142	1,938	3,025	0,681	3,295
0,35	1,585	0,067	0,986	1,978	1,401	0,738	2,478
0,4	1,596	0,02	0,373	1,995	0,532	0,78	1,812
0,45	1,6	0,002	0,096	1,999	0,137	0,81	1,34
J/2	1,6	0	0	2	0	0,833	0

Le tableau 1.1 présente les résultats pour ( $y$ ) variant de  $(-J/2)$  à  $(J/2)$ . Pour voir l'effet du rendement des pompes, on a utilisé la relation (1.15) avec ( $\eta_1 = \eta_2 = 1$ ) : c'est la colonne ( $F'(\eta=1)$ ). Les colonnes ( $R'$ ), ( $R'(\eta=1)$ ) et ( $R'(p=cst)$ ) sont obtenues par dérivation  
5 numérique.

Les graphiques des figures 1.2 et 1.3 permettent de visualiser les résultats.

La figure 1.2 reprend les lois de comportement et de débit : ( $F'$ ) est représenté en trait fort, ( $F'(\eta=1)$ ) en pointillés, ( $F'(p=cst)$ ) en tirets et ( $Q'$ ) en trait fin.

10 La figure 1.3 montre les courbes de raideur : ( $R'$ ) est représenté en trait fort, ( $R'(\eta=1)$ ) en pointillés et ( $R'(p=cst)$ ) en tirets.

Le premier constat, en comparant les courbes ( $F'$ ) et ( $F'(p=cst)$ ), est que les liaisons à report de pression ont une capacité de charge statique nettement supérieure à celle des  
15 liaisons à pression constante. Ce serait ne pas tenir compte de l'évolution du débit.

En effet, la courbe ( $Q'$ ) montre une baisse de débit qui va jusqu'à être nul : si le débit est insuffisant dans les alvéoles déchargées, il faut prévoir des infiltrations d'air. La forte charge maximum permet cependant d'encaisser un « crash », sous réserve de purger les alvéoles avant remise en service.

20 Les intérêts de notre invention apparaissent pourtant : le premier est la précharge, conséquence directe de l'opposition des alvéoles.

Un autre est le positionnement. En effet, la position de repos est indépendante de la pression d'alimentation ou de la surface des alvéoles. Le jeu de fonctionnement est choisi par le concepteur. La raideur est proportionnelle à ce jeu. Elle est également proportionnelle  
25 à la surface des alvéoles, est à la pression d'alimentation.

Cette raideur est le troisième intérêt visible sur la figure 1.2 : elle est nettement supérieure à celle d'une butée à pression constante. Au point ( $y=0$ ), elle correspond à celle d'une butée à débit constant avec  $P_0=P$ .

La comparaison des courbes ( $F'$ ) et ( $F'(\eta=1)$ ) montre que le rendement des pompes

diminue toutes les caractéristiques de la butée, ce qui était attendu. Il montre également une inflexion plus rapide de ( $F'$ ), c'est à dire une diminution de raideur plus rapide, due à l'évolution du rendement en fonction de la pression.

- 5 Sur la figure 1.3, la courbe ( $R'$ ) démontre l'instabilité des liaisons à report de pression lorsque le film d'huile au niveau du seuil devient trop fin. Cependant, nous avons déjà vu que ce point de fonctionnement était inexploitable en raison d'un débit trop faible.

Par contre, elle démontre aussi que la rigidité d'une telle butée est nettement supérieure à celle qu'aurait une butée alimentée à pression constante : plus de trois fois plus raide  
10 autour du point ( $y=0$ ). Faisons une comparaison avec un patin de rail à rouleaux taille 35. Leur rigidité est couramment de  $1000 \text{ N}/\mu\text{m}$ .

$$L = 81 \text{ mm} \quad l_1 = 48 \text{ mm} \quad n_1 = 1$$

$$\text{On choisit : } J = 0,2 \text{ mm} \quad P = 10 \text{ bars} \quad b_1 = 8 \text{ mm}$$

On obtient une raideur ( $R(y)$ ) :

$$15 \quad R_{(0)} = 172 \text{ N}/\mu\text{m} \quad R_{(0,02)} = 113 \text{ N}/\mu\text{m}$$

Les raideurs des liaisons à report de pression sont du même ordre de grandeur celle des patins à rouleaux. C'est d'autant plus vrai que nous n'avons pas choisi des valeurs extrêmes : le patin est de la gamme « compact » du catalogue et nous pouvons facilement augmenter la raideur de la butée hydrostatique en augmentant la pression ( $P$ ) ou en  
20 diminuant le jeu ( $J$ ). Ceci joint à l'absence d'attachement : les liaisons hydrostatiques à report de pression sont particulièrement compacts par rapport à leur rigidité.

L'effet du rendement des pompes est visible en comparant ( $R'$ ) et ( $R'_{(n=1)}$ ). On voit que ( $R'$ ) n'est pas une simple homothétie de ( $R'_{(n=1)}$ ), mais qu'elle est plus fine aux alentours de ( $y=0$ ). C'est l'effet de l'évolution du rendement des pompes en fonction de la pression :  
25 une perte de rigidité en fonction du déplacement plus marquée.

Ce phénomène est gênant dans la mesure où la pression usuelle d'alimentation des liaisons fluides va de 0,1 à 50 bars : c'est typiquement la gamme de pressions où le rendement des pompes hydrauliques varie le plus.

L'évolution du rendement est lié à celle de la pression : ce sera systématiquement au

point de rigidité maximum qu'il évoluera le plus. Cela signifie une réduction de la plage de fonctionnement.

### 1.3 Opposition de surfaces inégales

- 5 Le phénomène de report de pression autorise à mettre en opposition des surfaces hydrauliques de dimension différentes, théoriquement sans limite de rapport de taille. On peut jouer sur deux paramètres pour y arriver : le nombre d'alvéoles ou leur taille individuelle.

Dans cette partie, nous ne tiendrons pas compte du rendement des pompes.

#### 10 1.3.1 Nombre d'alvéoles inégaux

On étudie l'effet de la variation du rapport  $n_1/n_2$ . Pour cela, nous fixons  $n_1+n_2 = 10$ . Les dimensions des liaisons sont égales, leurs alimentation aussi.

On a alors :

$$\eta_1 = \eta_2 = 1 \quad n_1+n_2 = 10 \quad cy_1 = cy_2 \quad b_1 = b_2 \quad l_1 = l_2$$

- 15 La relation (1.13) se simplifie en :

$$F_n = 10PL(l_1 - b_1) \frac{n_1 \left(\frac{J}{2} + y\right)^3 - (10 - n_1) \left(\frac{J}{2} - y\right)^3}{n_1 \left(\frac{J}{2} + y\right)^3 + (10 - n_1) \left(\frac{J}{2} - y\right)^3} \quad (1.19)$$

soit  $F'_n = \frac{F_n}{PL(l_1 - b_1)}$

$$F'_n = 10 \frac{n_1 \left(\frac{J}{2} + y\right)^3 - (10 - n_1) \left(\frac{J}{2} - y\right)^3}{n_1 \left(\frac{J}{2} + y\right)^3 + (10 - n_1) \left(\frac{J}{2} - y\right)^3} \quad (1.20)$$

La relation (1.14) se simplifie en :

$$20 \quad Q_{in} = \frac{10PL}{6\mu b_1} \frac{\left(\frac{J}{2} - y\right)^3 \left(\frac{J}{2} + y\right)^3}{n_1 \left(\frac{J}{2} + y\right)^3 + (10 - n_1) \left(\frac{J}{2} - y\right)^3} \quad (1.21)$$

$$Q'_n = C \frac{\left(\frac{J}{2} - y\right)^3 \left(\frac{J}{2} + y\right)^3}{n_1 \left(\frac{J}{2} + y\right)^3 + (10 - n_1) \left(\frac{J}{2} - y\right)^3} \quad (1.22)$$

L'effort, le débit et la raideurs en fonction de la position ( $y$ ) ont été calculés pour trois rapports  $n_1/n_2$  : le premier correspond à une butée symétrique ( $n_1/n_2=1$ ), le second à une valeur réaliste ( $n_1/n_2=3/7$ ), le dernier à une valeur exagérée ( $n_1/n_2=1/9$ ). Les résultats sont présentés dans le tableau 1.2.

Tableau 1.2

y	n1 = 5 ; n2 = 5			n1 = 3 ; n2 = 7			n1 = 1 ; n2 = 9		
	F'n	Q'n	R'n	F'n	Q'n	R'n	F'n	Q'n	R'n
- J/2	-10	0	0	-10	0	0	-10	0	0
-0,45	-9,997	0,012	0,274	-9,999	0,009	0,118	-10	0,007	0,03
-0,4	-9,973	0,1	1,064	-9,988	0,071	0,457	-9,997	0,056	0,119
-0,35	-9,891	0,336	2,803	-9,953	0,241	1,213	-9,988	0,187	0,316
-0,3	-9,692	0,788	6,050	-9,867	0,568	2,655	-9,965	0,444	0,698
-0,25	-9,286	1,507	11,52	-9,688	1,099	5,197	-9,918	0,864	1,387
-0,2	-8,541	2,503	19,87	-9,347	1,866	9,418	-9,827	1,487	2,591
-0,15	-7,299	3,709	31,12	-8,746	2,870	16,01	-9,659	2,341	4,640
-0,1	-5,429	4,937	43,77	-7,746	4,056	25,48	-9,363	3,442	8,063
-0,05	-2,922	5,888	54,29	-6,198	5,272	37,46	-8,853	4,772	13,63
0	0	6,25	58,45	-4	6,25	49,78	-8	6,25	22,26
0,05	2,922	5,888	54,29	-1,22	6,667	58,25	-6,627	7,684	34,55
0,1	5,429	4,937	43,77	1,825	6,307	58,8	-4,545	8,727	49,43
0,15	7,299	3,709	31,12	4,660	5,238	50,72	-1,684	8,913	62,52
0,2	8,541	2,503	19,87	6,897	3,802	37,49	1,706	7,902	66,84
0,25	9,286	1,507	11,52	8,409	2,397	24,00	5,000	5,859	58,28
0,3	9,692	0,788	6,05	9,296	1,286	13,38	7,534	3,507	40,57
0,35	9,891	0,336	2,803	9,747	0,555	6,397	9,057	1,608	22,22
0,4	9,973	0,1	1,064	9,936	0,166	2,464	9,756	0,494	9,164
0,45	9,997	0,012	0,274	9,993	0,021	0,638	9,974	0,062	2,439
J/2	10	0	0	10	0	0	10	0	0

Ces résultats sont mis sous forme graphique dans les figures 1.4 et 1.5.

La figure 1.4 reprend les efforts (F'n) et l'image des débits (Q'n). les efforts (F'n) sont en traits épais : tirets épais pour ( $n_1/n_2=1$ ), trait continu épais pour ( $n_1/n_2=3/7$ ) et pointillés épais pour ( $n_1/n_2=1/9$ ). Les débits (Q'n) sont représentés en traits fins : tirets fins pour

( $n_1/n_2=1$ ), trait continu fin pour ( $n_1/n_2=3/7$ ) et pointillés fins pour ( $n_1/n_2=1/9$ ).

La figure 1.5 montre les raideurs ( $R'$ ), en tirets pour ( $n_1/n_2=1$ ), trait continu pour ( $n_1/n_2=3/7$ ) et en pointillés pour ( $n_1/n_2=1/9$ ).

L'analyse conjointe des figures 1.4 et 1.5 montre les conséquences des différentes répartitions d'un même nombre d'alvéoles.

Tout d'abord, cela n'affecte pas l'effort maximum admissible. Ensuite, le point de fonctionnement pour un effort extérieur nul se déplace d'autant plus que le rapport  $n_1/n_2$  est différent de 1. Le jeu se réduit du côté des alvéoles les moins nombreux, mais la rigidité de la butée augmente du même côté. Inversement, elle devient plus molle pour le côté opposé.

10 L'évolution de la raideur est cependant limitée.

On constate une séparation des points de débit maximum, de raideur maximum et d'effort nul. Les positions ( $y$ ) de ces trois points, pour chaque valeur de ( $n_1$ ) et ( $n_2$ ) sont rapportés dans le tableau 1.3.

Tableau 1.3

	$Q_n$ max	$F_n = 0$	$R_n$ max
$n_1 = 5 ; n_2 = 5$	0	0	0
$n_1 = 3 ; n_2 = 7$	0,052	0,0701	0,078
$n_1 = 1 ; n_2 = 9$	0,134	0,1754	0,194

15 Les écarts s'amplifient avec l'augmentation du rapport ( $n_1/n_2$ ). Cependant, même pour des valeurs importantes, les courbes montrent que le point de fonctionnement ( $F=0$ ) reste correct. L'augmentation du débit et de la raideur compense le fait qu'on ne travaille pas au point de débit et de raideur maximum.

C'est plus le déplacement du point de fonctionnement qui pose problème : le film d'huile des alvéoles les moins nombreux diminue exagérément.

20

Opposer un nombre inégal d'alvéoles a un intérêt majeur pour une liaison de type « appui plan » : dégager une surface de fixation. Plus généralement, cela permet de s'adapter à des contraintes d'encombrement.

25 Nous avons vu que le point de fonctionnement de la butée était modifié : il s'agit

cependant pas d'une méthode de réglage en position puisque cette position est discrète : elle dépend du rapport du nombre d'alvéoles.

### 1.3.2 Surface individuelles d'alvéoles inégales

5 Dans cette partie, nous faisons varier la surface individuelle des alvéoles, en conservant une surface hydraulique constante. Dans le cas de la figure 1.1, il s'agit la cote ( $l_2$ ) par rapport à ( $l_1$ ). La cote ( $L$ ) permettrait également de modifier la surface, si nous avions prévu d'agir sur elle. Mais cela modifierait également la surface d'échappement du fluide, c'est à dire la pression qui règne dans l'alvéole.

10 Nous posons :  $l_2 - b_2 = k(l_1 - b_1)$

Pour maintenir constante la surface hydraulique, la relation sera affectée d'un facteur  $2/(1+k)$

Par ailleurs :  $\eta_1 = \eta_2 = 1$        $n_1 = n_2$        $cy_1 = cy_2$        $b_1 = b_2$

La relation (1.13) se simplifie en :

$$15 \quad F_l = 2n_1 P L (l_1 - b_1) \frac{2 \cdot \left(\frac{J}{2} + y\right)^3 - k \left(\frac{J}{2} - y\right)^3}{1+k \left(\frac{J}{2} + y\right)^3 + \left(\frac{J}{2} - y\right)^3} \quad (1.23)$$

soit :  $F'_l = \frac{F_l}{2n_1 P L (l_1 - b_1)}$

$$F'_l = \frac{2 \cdot \left(\frac{J}{2} + y\right)^3 - k \left(\frac{J}{2} - y\right)^3}{1+k \left(\frac{J}{2} + y\right)^3 + \left(\frac{J}{2} - y\right)^3} \quad (1.24)$$

Le débit n'est pas affecté par une variation de ( $l_2$ ). Il répond à la relation (1.16) étudiée précédemment.

20 Le tableau 1.4 présente la variation de ( $F'_k$ ) en fonction de ( $y$ ), pour trois valeur de ( $k$ ). la valeur ( $k=1$ ) correspond à une butée symétrique étudiée au §1.2.

La figure 1.6 représente les lois de comportement ( $F'_k$ ) sous forme graphique. La courbe en pointillé correspond à ( $k=1$ ), la courbe en trait continu ( $k=2$ ), celle en tirets ( $k=3$ ). On

constate une translation des courbes vers le bas, sans changement de forme. Cette absence de changement de forme est confirmée par l'examen des raideurs dans le tableau 1.4. on constate l'absence de variation de la raideur en fonction de la position, quel que soit la valeur de (k).

- 5 Opposer des alvéoles de grande taille à d'autre plus petits permet de prendre ne compte une charge fixe. Cela permet aussi de modifier la position de fonctionnement.

Tableau 1.4

y	k = 1		k = 2		k = 3	
	F'k	R'k	F'k	R'k	F'k	R'k
- J/2	-1	0	-1,333	0	-1,5	0
-0,45	-1	0,027	-1,333	0,027	-1,5	0,027
-0,4	-0,997	0,106	-1,331	0,106	-1,497	0,106
-0,35	-0,989	0,28	-1,322	0,28	-1,489	0,28
-0,3	-0,969	0,605	-1,303	0,605	-1,469	0,605
-0,25	-0,929	1,152	-1,262	1,152	-1,429	1,152
-0,2	-0,854	1,987	-1,187	1,987	-1,354	1,987
-0,15	-0,73	3,112	-1,063	3,112	-1,230	3,112
-0,1	-0,543	4,377	-0,876	4,377	-1,043	4,377
-0,05	-0,292	5,429	-0,626	5,429	-0,792	5,429
0	0	5,845	-0,333	5,845	-0,5	5,845
0,05	0,292	5,429	-0,041	5,429	-0,208	5,429
0,1	0,543	4,377	0,21	4,377	0,043	4,377
0,15	0,73	3,112	0,397	3,112	0,23	3,112
0,2	0,854	1,987	0,521	1,987	0,354	1,987
0,25	0,929	1,152	0,595	1,152	0,429	1,152
0,3	0,969	0,605	0,636	0,605	0,469	0,605
0,35	0,989	0,28	0,656	0,28	0,489	0,28
0,4	0,997	0,106	0,664	0,106	0,497	0,106
0,45	1	0,027	0,666	0,027	0,5	0,027
J/2	1	0	0,667	0	0,5	0

### 1.4 Réglage de la position

Dans cette partie, nous ne tiendrons pas compte de l'influence du rendement des pompes.

- 5 Nous venons de voir qu'en opposant des alvéoles de dimension différentes, on modifiait la position de fonctionnement de la butée. Il existe deux autres manières d'atteindre ce résultat, cette fois en modifiant la pression régnant dans les alvéoles.

La première méthode consiste à modifier la cylindrée de la pompe alimentant l'alvéole. Si une alvéole reçoit un débit plus important que celle en vis à vis, son jeu de fonctionnement (cote h) sera plus important : on obtient un changement de position.

La seconde méthode consiste à jouer sur la perte de charge dans le seuil : on peut faciliter l'écoulement en augmentant la surface d'écoulement ou en diminuant la perte de charge dans le seuil (cote b). Il faudra alors une pression moins forte pour laisser passer le même débit, ce qui modifiera le jeu de fonctionnement (cote h).

15

#### 1.4.1 Action sur la cylindrée des pompes

Nous posons :  $cy_2 = k.cy_1$

Par ailleurs, tous les paramètres des alvéoles sont égaux :

$$n_1 = n_2 \quad l_1 = l_2 \quad b_1 = b_2 \quad \eta_1 = \eta_2 = 1$$

- 20 La relation (1.13) se simplifie en :

$$F_{cy} = n_1 P L (l_1 - b_1) \frac{(1+k) \left[ \left( \frac{J}{2} + y \right)^3 - k \left( \frac{J}{2} - y \right)^3 \right]}{\left( \frac{J}{2} + y \right)^3 + k^2 \left( \frac{J}{2} - y \right)^3} \quad (1.25)$$

$$\text{soit : } F'_{cy} = \frac{F_{cy}}{n_1 P L (l_1 - b_1)}$$

$$F'_{cy} = \frac{(1+k)\left[\left(\frac{J}{2}+y\right)^3 - k\left(\frac{J}{2}-y\right)^3\right]}{\left(\frac{J}{2}+y\right)^3 + k^2\left(\frac{J}{2}-y\right)^3} \quad (1.26)$$

5 La relation (1.14) se simplifie en :

$$Q_{1cy} = \frac{n_1 PL}{6\mu} \cdot \frac{(1+k)\left(\frac{J}{2}-y\right)^3 \left(\frac{J}{2}+y\right)^3}{\left(\frac{J}{2}+y\right)^3 + k^2\left(\frac{J}{2}-y\right)^3} \quad (1.27)$$

$$Q'_{cy} = C \frac{(1+k)\left(\frac{J}{2}-y\right)^3 \left(\frac{J}{2}+y\right)^3}{\left(\frac{J}{2}+y\right)^3 + k^2\left(\frac{J}{2}-y\right)^3} \quad (1.28)$$

L'effort, le débit et la raideurs en fonction de la position (y) ont été calculés pour  
10 trois valeurs de k : le premier correspond à une butée symétrique (k=1), le second à une  
valeur qui nous parait limite (k=1,5), le dernier à une valeur exagérée (k=3). Les résultats  
sont présentés dans le tableau 1.5. Ces résultats son mis sous forme graphique dans les  
figures 1.7 et 1.8.

La figure 1.7 présente les loi de comportement (F'cy) et de débit (Q'cy). Les lois de  
15 comportement sont représentées en trait épais, les lois de débit en traits fins. En pointillés  
épais, nous avons (F'cy) pour (k=1), en trait continu épais (F'cy) pour (k=1,5) et (F'cy) pour  
(k=3) en tirets épais. De même, en pointillés fins, nous avons (Q'cy) pour (k=1), en trait  
continu fin (Q'cy) pour (k=1,5) et (Q'cy) pour (k=3) en tirets fins.

La figure 1.8 représente les raideurs (R'cy) pour les trois valeurs de (k). pour (k=1),  
20 (R'cy) est représenté en pointillé, en trait continu pour (k=1,5) et en tirets pour (k=3).

Tableau 1.5

y	k=1			k = 1,5			k = 3		
	F'cy	Q'cy	R'cy	F'cy	Q'cy	R'cy	F'cy	Q'cy	R'cy
-J/2	-2	0	0	-1,667	0	0	-1,333	0	0
-0,45	-1,999	0,006	0,055	-1,666	0,003	0,025	-1,333	0,001	0,008
-0,4	-1,995	0,05	0,213	-1,664	0,028	0,099	-1,333	0,011	0,032
-0,35	-1,978	0,168	0,561	-1,657	0,094	0,262	-1,330	0,037	0,084
-0,3	-1,938	0,394	1,21	-1,638	0,221	0,573	-1,324	0,089	0,186
-0,25	-1,857	0,753	2,304	-1,599	0,427	1,121	-1,311	0,173	0,37
-0,2	-1,708	1,251	3,973	-1,526	0,725	2,029	-1,287	0,297	0,691
-0,15	-1,46	1,854	6,224	-1,396	1,114	3,44	-1,242	0,468	1,237
-0,1	-1,086	2,469	8,754	-1,182	1,571	5,454	-1,163	0,688	2,150
-0,05	-0,584	2,944	10,86	-0,851	2,036	7,972	-1,027	0,954	3,633
0	0	3,125	11,69	-0,385	2,404	10,51	-0,8	1,25	5,935
0,05	0,584	2,944	10,86	0,2	2,551	12,18	-0,434	1,537	9,212
0,1	1,086	2,469	8,754	0,833	2,400	12,17	0,121	1,745	13,18
0,15	1,46	1,854	6,224	1,417	1,983	10,40	0,884	1,783	16,67
0,2	1,708	1,251	3,973	1,873	1,434	7,626	1,788	1,580	17,82
0,25	1,857	0,753	2,304	2,179	0,901	4,854	2,667	1,172	15,54
0,3	1,938	0,394	1,21	2,358	0,483	2,696	3,342	0,701	10,82
0,35	1,978	0,168	0,561	2,449	0,208	1,287	3,749	0,322	5,925
0,4	1,995	0,05	0,213	2,487	0,062	0,495	3,935	0,099	2,444
0,45	1,999	0,006	0,055	2,499	0,008	0,128	3,993	0,012	0,65
J/2	2	0	0	3	0	0	4	0	0

Lorsqu'on augmente la cylindrée des pompes pour un côté de la butée, nous constatons :

- 5 - un déplacement dans la direction des alvéoles recevant le plus faible débit
- une baisse de débit d'alimentation de ces mêmes alvéoles. N'oublions cependant pas que les alvéoles en vis à vis, qui ont un jeu de fonctionnement plus important, reçoivent un débit plus important. Il n'y a pas de risque de désamorçage de ces alvéoles.
- 10 - La diminution de la rigidité au point ( $F=0$ ).

La baisse de débit pose le problème de l'évacuation de la chaleur. C'est cependant la perte de rigidité qui nous préoccupe le plus : nous rappelons que nous souhaitons utiliser ces liaisons dans le cadre des machines outil.

Cette méthode permet cependant d'ajuster la position de fonctionnement, dans une

plage de +/- 5% du jeu de fonctionnement, sans modifier sensiblement le comportement de la butée. Au delà, on peut utiliser cette méthode en modifiant également la surface des alvéoles, comme décrit au §1.3.2. En augmentant la surface des alvéoles recevant le plus grand débit, on peut rétablir la rigidité de la butée.

5

#### 1.4.2 Action sur la perte de charge

Nous posons :  $b_2 = k.b_1$

Pour maintenir des surfaces hydrauliques équivalentes, nous posons :  $l_1 - b_1 = l_2 - b_2$

Par ailleurs, tous les paramètres des alvéoles sont égaux :

$$10 \quad n_1 = n_2 \quad cy_1 = cy_2 \quad \eta_1 = \eta_2 = 1$$

La relation (1.13) se simplifie en :

$$F_b = 2n_1 PL(l_1 - b_1) \frac{\left(\frac{J}{2} + y\right)^3 - k\left(\frac{J}{2} - y\right)^3}{\left(\frac{J}{2} + y\right)^3 + k\left(\frac{J}{2} - y\right)^3} \quad (1.29)$$

soit :  $F'_b = \frac{F_b}{2n_1 PL(l_1 - b_1)}$

$$15 \quad F'_b = \frac{\left(\frac{J}{2} + y\right)^3 - k\left(\frac{J}{2} - y\right)^3}{\left(\frac{J}{2} + y\right)^3 + k\left(\frac{J}{2} - y\right)^3} \quad (1.30)$$

La relation (1.14) se simplifie en :

$$Q_{1b} = \frac{2PL}{6\mu b_1} \frac{\left(\frac{J}{2} - y\right)^3 \left(\frac{J}{2} + y\right)^3}{\left(\frac{J}{2} + y\right)^3 + k\left(\frac{J}{2} - y\right)^3} \quad (1.31)$$

$$Q'_b = C_{ste} \frac{\left(\frac{J}{2} - y\right)^3 \left(\frac{J}{2} + y\right)^3}{\left(\frac{J}{2} + y\right)^3 + k\left(\frac{J}{2} - y\right)^3} \quad (1.32)$$

L'effort, le débit et la raideurs en fonction de la position ( $y$ ) ont été calculés pour trois valeurs de  $k$  : le premier correspond à une butée symétrique ( $k=1$ ), le second à une valeur qui nous parait limite ( $k=2$ ), le dernier à une valeur exagérée ( $k=3$ ). Les résultats sont présentés dans le tableau 1.6. Ces résultats son mis sous forme graphique dans les figures 1.9 et 1.10.

La figure 1.9 présente les loi de comportement ( $F'b$ ) et de débit ( $Q'b$ ). Les lois de comportement sont représentées en trait épais, les lois de débit en traits fins. En pointillés épais, nous avons ( $F'b$ ) pour ( $k=1$ ), en trait continu épais ( $F'b$ ) pour ( $k=2$ ) et ( $F'b$ ) pour ( $k=3$ ) en tirets épais. De même, en pointillés fins, nous avons ( $Q'b$ ) pour ( $k=1$ ), en trait continu fin ( $Q'b$ ) pour ( $k=2$ ) et ( $Q'b$ ) pour ( $k=3$ ) en tirets fins.

La figure 1.10 représente les raideurs ( $R'b$ ) pour les trois valeurs de ( $k$ ). Pour ( $k=1$ ), ( $R'b$ ) est représenté en pointillé, en trait continu pour ( $k=2$ ) et en tirets pour ( $k=3$ ).

Tableau 1.6

y	k = 1			k = 2			k = 3		
	F'b	Q'b	R'b	F'b	Q'b	R'b	F'b	Q'b	R'b
-J/2	-2	0	0	-2	0	0	-2	0	0
-0,45	-1,999	0,003	0,055	-2	0,002	0,027	-2	0,001	0,018
-0,4	-1,995	0,025	0,213	-1,997	0,012	0,107	-1,998	0,008	0,071
-0,35	-1,978	0,084	0,561	-1,989	0,042	0,283	-1,993	0,028	0,189
-0,3	-1,938	0,197	1,21	-1,969	0,099	0,618	-1,979	0,066	0,415
-0,25	-1,857	0,377	2,304	-1,927	0,192	1,205	-1,951	0,129	0,815
-0,2	-1,708	0,626	3,973	-1,849	0,325	2,169	-1,898	0,219	1,491
-0,15	-1,46	0,927	6,224	-1,710	0,497	3,647	-1,802	0,34	2,573
-0,1	-1,086	1,234	8,754	-1,484	0,697	5,703	-1,64	0,485	4,197
-0,05	-0,584	1,472	10,86	-1,14	0,894	8,172	-1,382	0,642	6,404
0	0	1,563	11,69	-0,667	1,042	10,49	-1	0,781	8,958
0,05	0,584	1,472	10,86	-0,091	1,087	11,78	-0,487	0,862	11,18
0,1	1,086	1,234	8,754	0,512	1,005	11,39	0,118	0,847	12,11
0,15	1,46	0,927	6,224	1,048	0,817	9,443	0,724	0,73	11,18
0,2	1,708	0,626	3,973	1,456	0,583	6,759	1,236	0,546	8,759
0,25	1,857	0,377	2,304	1,724	0,364	4,229	1,6	0,352	5,85
0,3	1,938	0,197	1,21	1,879	0,194	2,324	1,821	0,191	3,351
0,35	1,978	0,084	0,561	1,957	0,083	1,103	1,935	0,083	1,627
0,4	1,995	0,025	0,213	1,989	0,025	0,423	1,984	0,025	0,631
0,45	1,999	0,003	0,055	1,999	0,003	0,109	1,998	0,003	0,164
J/2	2	0	0	2	0	0	2	0	0

Nous constatons que les efforts maximaux admissibles ne varie pas, et que la rigidité varie peu : la courbe de comportement ( $F'_b$ ) se translate sans changement majeur. Cela se paie d'une baisse importante de débit. Cette baisse est quasiment proportionnelle au déplacement.

5 Les maximum de raideur et de débit restent proche du point  $F=0$ , même pour  $k=3$ . Cela représente une limite pratique : on ne peut pas augmenter indéfiniment la largeur du seuil (cote  $b$ ). D'autant la valeur du déplacement obtenue croit en fonction du carré du rapport ( $k$ ).

10 Nous obtenons un réglage en position de l'ordre de +/- 10% de la valeur du jeu ( $J$ ), sans modification importante du comportement de la butée. Il restera à vérifier que le débit est compatible avec le fonctionnement attendu.

C'est à notre sens la méthode la plus pratique d'ajuster la position de fonctionnement. Elle a l'avantage de ne pas demander de modification des pompes, qui peuvent alors être prises « sur l'étagère ».

15

#### **1.4.3 Méthode de réglage après mise en service**

Les méthodes décrites précédemment pour modifier la position de fonctionnement repose sur la modification des pièces mécaniques. La position obtenue est liée aux précision de réalisation, et elle ne peut pas être modifiée à la demande. Mais il existe un moyen de  
20 régler la position de fonctionnement après montage.

Il s'agit de diminuer le débit d'alimentation de chaque alvéole, en installant une dérivation sur le circuit hydraulique entre chaque alvéole et sa pompe d'alimentation. Chaque dérivation est étranglée par une résistance hydraulique réglable avant le retour au bac. Il suffit de s'assurer que les réglages des résistances hydrauliques soient accessible pour  
25 avoir une possibilité de réglage de la position après mise en service.

La figure 1.11 illustre ce principe. Elle représente un sous ensemble maintenu en suspension dans le sens vertical par rapport à un bâti au moyen d'un butée hydrostatique à report de pression. Celle ci est constituée de 2 alvéoles en opposition. Sur chaque circuit d'alimentation, une dérivation est pratiquée, qui est étranglée par une résistance hydraulique.

Sur le plan théorique, cette solution est bancale. Un déplacement du sous ensemble guidé amènerait une variation de la perte de charge dans les seuils des alvéoles, ce qui modifierait le rapport de débit entre l'alvéole et la dérivation.

- 5 En pratique, nous visons le positionnement, c'est à dire des déplacement de l'ordre du dixième de micron. L'évolution de la perte de charge dans les seuils peut être négligée. Nous avons alors un réglage se comportant exactement comme une variation de cylindrée. Le comportement a été décrit au §1.4.1.

- Les résistances hydrauliques peuvent être insérés n'importe où en aval des pompes.
- 10 En particulier, il est facile d'insérer des diviseurs de débit directement dans les corps de pompe.

## 2 Connexions entre liaisons à report de pression

### 2.1 Généralités

Un sous ensemble est couramment guidé par plusieurs liaisons indépendantes. Par exemple, un palier peut être constitué de deux butées à double effet (dans l'hypothèse de très faibles déplacements, la forme des pièces n'influe pas). Une broche sera généralement guidée par deux paliers et une butée axiale, soit un minimum de six liaisons à report de pression.

En cas de charge combinée, un déplacement au niveau d'une liaison provoquera un déplacement au niveau de tous les autres liaisons du guidage. Ce phénomène n'est pas spécialement gênant : il est courant dans les liaisons mécaniques, tel les roulements à contact obliques ou les queues d'arondes. La rigidité des liaisons à report de pression implique une faible amplitude de mouvement.

### 2.2 Cadre d'étude

#### 2.2.1 Système étudié

L'étude se base sur un sous ensemble maintenu en suspension par deux butées hydrostatique à report de pression, tel que représenté sur la *figure 2.1*.

Les deux butées sont perpendiculaires. Celle qui s'oppose aux mouvements verticaux est symétrique : les alvéoles sont tous de dimension égales et le nombre d'alvéoles, variable, est le même de chaque côté. La butée dans le sens horizontal est constituée de deux alvéoles identiques en opposition.

Les pompes alimentant la butée verticale sont identiques, les pompes alimentant la butée horizontale aussi. Elles sont toutes accouplées en rotation.

Un repère est associé au sous ensemble mobile, situé en son centre. Un autre, situé au centre du logement, est associé au sous ensemble fixe.

Nous faisons l'hypothèse de l'absence de moment fléchissant. En l'absence de rotation, les alvéoles supérieures ont le même jeu de fonctionnement, les alvéoles inférieures aussi. En raison de l'identité des pompes et du jeu de fonctionnement, la pression

d'alimentation est identique dans les alvéoles supérieurs. Pour les mêmes raisons, la pression d'alimentation est identique dans les alvéoles inférieurs.

Afin de s'affranchir des effets de bord, nous considérons une butée infiniment longues : les calculs seront faits pour une longueur (L) de butée.

- 5 L'influence du rendement des pompes ne sera pas étudié.

### 2.2.2 Équations

#### Butée horizontale

##### Alvéole de droite : indice 1

	Largeur totale :	$l_1$	cylindrée des pompes :	$cy_1$
10	largeur de seuil :	$b_1$	Longueur	L
	pression d'alimentation :	$P_1$	Débit d'alimentation :	$Q_1$
	Réaction à la pression des alvéoles :	$W_1$		
	Épaisseur du film d'huile :	$h_1$		

##### 15 Alvéole de droite : indice 3

	Largeur totale :	$l_1$	cylindrée des pompes :	$cy_1$
	largeur de seuil :	$b_1$	Longueur	L
	pression d'alimentation :	$P_3$	Débit d'alimentation :	$Q_1$
	Réaction à la pression des alvéoles :	$W_3$		
20	Épaisseur du film d'huile :	$h_3$		

#### Butée verticale

##### Alvéoles supérieures : indice 2

	Largeur totale :	$l_2$	cylindrée des pompes :	$cy_2$
25	largeur de seuil :	$b_2$	Longueur	L

pression d'alimentation :  $P_2$  Débit d'alimentation :  $Q_2$   
 Réaction à la pression des alvéoles :  $W_2$   
 Épaisseur du film d'huile :  $h_2$

5 Alvéole inférieures : indice 4

Largeur totale :  $l_2$  cylindrée des pompes :  $cy_2$   
 largeur de seuil :  $b_2$  Longueur :  $L$   
 pression d'alimentation :  $P_4$  Débit d'alimentation :  $Q_2$   
 Réaction à la pression des alvéoles :  $W_4$

10 Épaisseur du film d'huile :  $h_4$

Données générales

Pression centralisée  $P$  Débit général  $Q$   
 Vitesse des pompes  $N$  Viscosité du fluide  $\mu$   
 15 Position horizontale  $x$  Position verticale  $y$   
 Effort extérieur horizontal  $F_x$  Effort extérieur vertical  $F_y$   
 Jeu total horizontal :  $J_x$  ( $J_x = h_1 + h_3$ )  
 Jeu total vertical :  $J_y$  ( $J_y = h_2 + h_4$ )

20 équilibre mécanique : 
$$\begin{aligned} F_x &= W_1 - W_3 \\ F_y &= W_2 - W_4 \end{aligned} \quad (2.1)$$

Conservation de la puissance 
$$PQ = Q_1(P_1 + P_3) + nQ_2(P_2 + P_4) \quad (2.2)$$

*Nota : l'influence du rendement des pompes a été étudié au §1.2.*

Conservation du débit 
$$Q = 2Q_1 + 2nQ_2 \quad (2.3)$$

Charge supportée par 1 butée  $W = \iint_S p(x) dS$

5 Soit  $W_1 = P_1 L(l_1 - b_1)$   
 $W_3 = P_3 L(l_1 - b_1)$   
 $W_2 = n P_2 L(l_2 - b_2)$   
 $W_4 = n P_4 L(l_2 - b_2)$  (2.4)

Vitesse d'écoulement du fluide  $u = \frac{1}{2\mu} y(y-h) \frac{dp}{dx}$

débit volumique  $Q_1 = 2L \int_0^h u(x=0) dy$

soit  $Q_1 = \frac{P_1 h_1^3 L}{6\mu b_1} = \frac{P_3 h_3^3 L}{6\mu b_1}$   
 $Q_2 = \frac{P_2 h_2^3 L}{6\mu b_2} = \frac{P_4 h_4^3 L}{6\mu b_2}$  (2.5)

10 Débit des pompes  $Q_1 = cy_1 N$  et  $Q_2 = cy_2 N$  (2.6)

Nous posons ( $J_x$ ) comme le jeu diamétral selon ( $x$ ) et ( $J_y$ ) le jeu diamétral selon ( $y$ ).

$$J_x = h_1 + h_3$$

$$J_y = h_2 + h_4$$

15 position du repère  $h_1 = \frac{J_x}{2} - x$   $h_3 = \frac{J_x}{2} + x$   
 $h_2 = \frac{J_y}{2} - y$   $h_4 = \frac{J_y}{2} + y$  (2.7)

### 2.2.3 Résolution

20 Nous cherchons la loi de comportement du système de guidage dans le plan ( $x, y$ ). La méthode de résolution consiste, dans la relation (2.2), à exprimer tous les débits d'alimentation en fonction d'un seul, et toutes les pressions d'alimentation en fonction d'une seule. Par exemple :

- exprimer ( $Q_2$ ) en fonction de ( $Q_1$ ) à l'aide de la relation (2.6)
- l'introduire dans (2.3) pour avoir ( $Q$ ) en fonction de ( $Q_1$ ) et dans (2.5) pour avoir ( $P_2$ ) et ( $P_4$ ) en fonction de ( $P_1$ )

- se servir de (2.5) pour avoir (P<sub>3</sub>) en fonction de (P<sub>1</sub>)
- tout introduire dans (2.2) : (Q<sub>1</sub>) se simplifie, on obtient (P<sub>1</sub>) en fonction de (x) et de (y)
- on en déduit (P<sub>2</sub>), (P<sub>3</sub>) et (P<sub>4</sub>)

5 Nous posons comme variable intermédiaire :

$$H_1(x, y) = \left[ \left( \frac{J_x}{2} + x \right) \left( \frac{J_y}{2} - y \right) \left( \frac{J_y}{2} + y \right) \right]^3 \quad H_3(x, y) = \left[ \left( \frac{J_x}{2} - x \right) \left( \frac{J_y}{2} - y \right) \left( \frac{J_y}{2} + y \right) \right]^3$$

$$H_2(x, y) = \left[ \left( \frac{J_x}{2} - x \right) \left( \frac{J_x}{2} + x \right) \left( \frac{J_y}{2} + y \right) \right]^3 \quad H_4(x, y) = \left[ \left( \frac{J_x}{2} - x \right) \left( \frac{J_x}{2} + x \right) \left( \frac{J_y}{2} - y \right) \right]^3$$

$$F_x(x, y) = 2PL(l_1 - b_1) \frac{b_1 cy_1 (cy_1 + ncy_2)(H_1 - H_3)}{b_1 cy_1^2 (H_1 + H_3) + nb_2 cy_2^2 (H_2 + H_4)} \quad (2.8)$$

$$F_y(x, y) = 2nPL(l_2 - b_2) \frac{b_2 cy_2 (cy_1 + ncy_2)(H_2 - H_4)}{b_1 cy_1^2 (H_1 + H_3) + nb_2 cy_2^2 (H_2 + H_4)} \quad (2.9)$$

10 Nous nous intéressons également à l'évolution du débit. Nous pouvons nous contenter du débit dans une seule alvéole : c'est représentatif du débit de chaque alvéole, et du débit d'alimentation générale.

$$Q_1(x, y) = \frac{2PL}{6\mu} \frac{cy_1 (cy_1 + ncy_2)(H_1 - H_3) \left( \frac{J_x}{2} - x \right)^3}{b_1 cy_1^2 (H_1 + H_3) + nb_2 cy_2^2 (H_2 + H_4)} \quad (2.10)$$

#### 2.2.4 Convention d'écriture

15 Dans la suite de cette étude, nous allons nous intéresser à la butée horizontale, dont la loi de comportement correspond à l'équation (2.8). Dans cette équation, la pression du réseau et la surface des alvéoles est un facteur fixe : pour paramétrer l'équation en fonction de ses dimensions et des conditions d'alimentation, nous posons :

$$F'(x, y) = \frac{F}{2PL(l_1 - b_1)} = \frac{b_1 cy_1 (cy_1 + ncy_2)(H_1 - H_3)}{b_1 cy_1^2 (H_1 + H_3) + nb_2 cy_2^2 (H_2 + H_4)} \quad (2.11)$$

20 Lorsque nous feront évoluer (b<sub>1</sub>), le terme (l<sub>1</sub>-b<sub>1</sub>) restera constant.

Seule l'évolution du débit nous intéresse : nous posons ( $Q'(x,y)$ ) comme l'image du débit ( $Q_1$ ). Soit :

$$Q'(x,y) = C \frac{cy_1(cy_1 + ncy_2)(H_1 - H_3)\left(\frac{J_x}{2} - x\right)^3}{b_1cy_1^2(H_1 + H_3) + nb_2cy_2^2(H_2 + H_4)} \quad (2.12)$$

Avec (C) constante ajustée en fonction de la lisibilité des figures.

- 5 Par la suite nous allons faire varier deux paramètres : le nombre d'alvéoles de la butée verticale (n) et les largeurs de seuil (b). Les relations (2.11) et (2.12) se simplifieront : ( $F'$ ) et ( $Q'$ ) se verront affecter un indice rappelant la variable étudiée.

### 2.3 Influence des différents paramètre

#### 10 2.3.1 Nombre d'alvéoles du guidage

Dans cette partie, nous allons étudier l'influence du nombre d'alvéoles de la butée verticale. Nous ne ferons donc varier que (n).

Nous posons :  $cy_2 = cy_1$   $b_2 = b_1$

La relation (2.11) se simplifie en :  $F'_n(x,y) = \frac{(1+n)(H_1 - H_3)}{(H_1 + H_3) + n(H_2 + H_4)} \quad (2.13)$

15 La relation (2.12) se simplifie en :  $Q'_n(x,y) = C \frac{(1+n)(H_1 - H_3)\left(\frac{J_x}{2} - x\right)^3}{(H_1 + H_3) + n(H_2 + H_4)} \quad (2.14)$

Dans un premier temps, les seuls efforts extérieurs sont horizontaux : nous posons ( $x=0$ ). L'effort et le débit en fonction de la position (y) ont été calculés pour trois valeurs de n.

- 20 La première, (n=0), correspond à une butée symétrique isolée étudiée au §1.2. Cette valeur sert de référence pour étudier l'influence des connexions. La seconde, (n=1), correspond à deux butées identiques connectées : typiquement un palier. Enfin, (n=3) correspond à un guidage complet dont une seule liaison travaille.

Les résultats sont présentés dans le tableau 2.1. Ces résultats sont mis sous forme graphique dans la figures 2.2.

Tableau 2.1

x	n=0		n=1		n=3	
	F'n	Q'n	F'n	Q'n	F'n	Q'n
- Jy/2	-1	0	-2	0	-4	0
-0,45	-1	0,006	-1,995	0,012	-3,975	0,025
-0,4	-0,997	0,05	-1,963	0,098	-3,807	0,191
-0,35	-0,989	0,168	-1,877	0,319	-3,407	0,578
-0,3	-0,969	0,394	-1,721	0,7	-2,813	1,143
-0,25	-0,929	0,753	-1,496	1,214	-2,155	1,749
-0,2	-0,854	1,251	-1,22	1,787	-1,552	2,274
-0,15	-0,73	1,854	-0,916	2,327	-1,05	2,668
-0,1	-0,543	2,469	-0,607	2,758	-0,644	2,93
-0,05	-0,292	2,944	-0,301	3,032	-0,306	3,078
0	0	3,125	0	3,125	0	3,125
0,05	0,292	2,944	0,301	3,032	0,306	3,078
0,1	0,543	2,469	0,607	2,758	0,644	2,93
0,15	0,73	1,854	0,916	2,327	1,05	2,668
0,2	0,854	1,251	1,22	1,787	1,552	2,274
0,25	0,929	0,753	1,496	1,214	2,155	1,749
0,3	0,969	0,394	1,721	0,7	2,813	1,143
0,35	0,989	0,168	1,877	0,319	3,407	0,578
0,4	0,997	0,05	1,963	0,098	3,807	0,191
0,45	1	0,006	1,995	0,012	3,975	0,025
Jy/2	1	0	2	0	4	0

- 5 Sur la figure 2.2, les courbes épaisses correspondent aux lois de comportement (F'n), les courbes fines aux débits (Q'n). Ainsi, la courbe en pointillés épais correspond à (F'n) pour (n=0), celle en trait épais à (n=1) et celle en tirets à (n=3). De même, la courbe en pointillés fins correspond à (Q'n) pour (n=0), celle en trait fin à (n=1) et celle en tiret fins à (n=3).
- 10 Les courbes de comportement montrent une augmentation de l'effort maximum admissible en rapport avec le nombre d'alvéoles connectées, mais pas de modification du comportement au point de fonctionnement (F=0) : la raideur reste la même. Par contre, elle augmente lorsque l'on s'éloigne de ce point. La baisse de débit en fonction du déplacement est retardée.

Cela signifie les connexions influent peu sur comportement des liaisons, et que de faibles déplacements au sein d'une liaison ont une influence négligeable sur les autres liaisons. Lors d'une utilisation pour le positionnement et la rigidité, on peut connecter les liaisons à report de pression sans limites.

- 5 Par contre, l'augmentation de raideur et de débit par rapport à une liaison indépendante, signifie une plage de fonctionnement plus grande : nous pensons là aux configurations étudiées précédemment, où le lieu du maximum de débit était différent du lieu des maximum de raideur (§1.3.1, §1.4.1 et §1.4.2). Connecter les liaisons permet d'augmenter leur plages de réglage.

10

La valeur ( $n=1$ ) est particulière dans la mesure où elle correspond à un palier hydrostatique à quatre alvéoles. En effet, pour de très faibles déplacement, la forme n'influe pas sur la répartition des efforts. Elle peut alors être modélisée par deux butées perpendiculaires agissant sur une pièce prismatique.

15

Tableau 2.2

x	F'(x, 0)	F'(x, 0.1)	F'(x, 0.2)	F'(x, 0.3)	F'(x, 0.4)
-J/2	-2	-2	-2	-2	-2
	-1,995	-1,994	-1,989	-1,968	-1,777
-0,4	-1,963	-1,955	-1,918	-1,77	-0,997
	-1,877	-1,852	-1,744	-1,387	-0,454
-0,3	-1,721	-1,672	-1,474	-0,969	-0,218
	-1,496	-1,423	-1,159	-0,638	-0,115
-0,2	-1,22	-1,133	-0,854	-0,409	-0,066
	-0,916	-0,834	-0,588	-0,256	-0,038
-0,1	-0,607	-0,543	-0,365	-0,149	-0,022
	-0,301	-0,267	-0,174	-0,069	-0,01
0	0	0	0	0	0
	0,301	0,267	0,174	0,069	0,01
0,1	0,607	0,543	0,365	0,149	0,022
	0,916	0,834	0,588	0,256	0,038
0,2	1,22	1,133	0,854	0,409	0,066
	1,496	1,423	1,159	0,638	0,115
0,3	1,721	1,672	1,474	0,969	0,218
	1,877	1,852	1,744	1,387	0,454
0,4	1,963	1,955	1,918	1,77	0,997
	1,995	1,994	1,989	1,968	1,777
J/2	2	2	2	2	2

Nous avons calculé les lois de comportement de la butée horizontales ( $F'(x,y)$ ) pour différentes valeurs de ( $y$ ). les résultats sont présentés dans le tableau 2.2.

Ces résultats sont mis sous forme graphique sur la figure 2.3. La courbe en trait épais correspond à la colonne ( $F'(x, 0)$ ), celle en traits fins, presque confondue, à ( $F'(x, 0,1)$ ).  
5 ( $F'(x, 0,2)$ ) est tracé en pointillés, ( $F'(x, 0,3)$ ) en tirets épais et ( $F'(x, 0,4)$ ) en tirets fins.

On constate une diminution de la raideur au point ( $x=0$ ) au fur et à mesure que la cote ( $y$ ) augmente. Cependant, cette diminution est encore peu sensible pour ( $y = 0,1 J_y$ ). Cela confirme ce que nous avons constaté précédemment : dans le cadre de très faibles  
10 déplacement (positionnement), l'influences des liaisons entre elles peut être négligée.

### 2.3.2 Différentiel de pression

Toutes les liaisons composants un guidage ne seront pas forcément alimentées avec la même pression. Il est inutile de ne pas centraliser les alimentation des pompes : à travers les accouplements mécaniques, c'est la puissance hydraulique globale qui est prise en  
15 compte. Différencier les pressions d'alimentations n'est utile que si on déconnecte les liaisons.

La suppression d'un certain nombre d'accouplements peut sembler une simplification de l'installation. Mais nous avons évoqué l'utilisation des pompes à palette pour notre application : connecter les alvéoles, c'est diminuer le nombre de corps de pompes, c'est  
20 simplifier la mécanique et diminuer l'encombrement.

Pour modifier la pression d'alimentation d'une liaison par rapport à une autre, nous pouvons modifier le rapport de cylindrée : une augmentation de débit implique une augmentation de pression. Autrement, nous pouvons faire varier la perte de charge en sortie d'alvéole : une diminution du jeu de fonctionnement ( $J_x$ ), ou une augmentation de la largeur  
25 ( $b$ ) du seuil aura le même effet. Par l'intermédiaire des pompes, ces modification se répercutent sur les liaisons liées, dont les pression baissent.

L'action sur chacune de ces variables a les mêmes effets sur la loi comportement. Nous ne ferons donc varier que ( $b$ ).

30

Nous posons :  $n=1$   $cy_2=cy_1$   $b_2=k.b_1$

La relation (2.11) se simplifie en : 
$$F'_b(x, y) = \frac{2(H_1 - H_3)}{(H_1 + H_3) + k(H_2 + H_4)} \quad (2.15)$$

La relation (2.12) se simplifie en : 
$$Q'_b(x, y) = C \frac{2(H_1 - H_3) \left(\frac{J_x}{2} - x\right)^3}{(H_1 + H_3) + k(H_2 + H_4)} \quad (2.16)$$

La loi de comportement (F'b) a été calculée pour trois rapport (k) : la valeur (k=1) permet d'avoir une référence. La valeur (k=0,25) signifie que la perte de charge de la butée horizontale a été augmentée par rapport à la butée verticale. La valeur (k=4) signifie que la perte de charge de la butée horizontale a été diminuée.

Les résultats sont présentés dans le tableau 2.3. Ils sont mis sous forme graphique dans la figure 2.4. En pointillés, nous avons (F'b) pour (n=0,25), (n=1) en trait continu et (n=4) en tirets.

On constate l'augmentation de la rigidité avec la perte de charge, et sa baisse dans les mêmes proportions si la perte de charge diminue. Autrement dit, la puissance hydraulique se concentre dans une liaison au détriment des autres.

La différence entre agir sur les cylindrées et les pertes de charge dans les seuils tient au débit : une modification du rapport de cylindrée change le débit d'alimentation d'une liaison par rapport aux autres.

Nous avons ainsi trois paramètres permettant d'adapter les caractéristiques d'une liaison par rapport à celles qui lui sont connectées.

### 3 **Les pompes d'alimentation**

#### 3.1 **Généralités**

L'utilisation des liaisons à report de pression implique de résoudre un problème majeur : la complexité des pompes, et leur encombrement. Non seulement il est impératif  
5 d'installer une pompe par alvéole, mais il faut aussi les fixer au sous-ensemble qui porte les alvéoles. Or il faut au minimum quatre alvéoles pour une glissière et un pivot complet est composé d'au moins six alvéoles.

Les contraintes ne laissent pas grand choix : nous avons besoin de pompes à débit continu, volumétriques et réversibles. Cela nous laisse le choix entre les pompes à engrenage  
10 et les pompes à palettes.

Les pompes à palettes « équilibrées » ont deux aspirations et refoulements indépendants, diamétralement opposés. Le but est de diminuer les efforts sur les paliers en répartissant les pressions sur le rotor. Dans ce cadre, les refoulements sont communs. Mais si  
15 chaque refoulement alimente un récepteur indépendant, on obtient deux pompes liées en rotation, montées dans le même corps de pompe.

Si c'est une solution complexe pour alimenter deux récepteurs, rien n'empêche d'augmenter le nombre de refoulements : la complexité n'augmente pas avec le nombre de sorties. Plus le nombre de récepteurs augmente, plus cette solution devient simple. Rien  
20 n'interdit non plus de d'alimenter les récepteurs avec des débits différents : il est possible de varier les cylindrées dans un même corps de pompe.

Une même admission peut alimenter plusieurs refoulements. Nous en donnerons un exemple. Cette méthode impose des courses de palettes plus longues, mais permet de gagner de la place sur le stator. Par contre, le sens de rotation est imposé.

#### 25 3.2 **Stator avec une admission par refoulement**

La figure 3.1 donne un exemple de pompe à palette conçue comme un diviseur de débit, avec un refoulement par admission. Comme la technologie des pompes à palette sort du cadre de notre étude, seuls les éléments principaux sont représentés.

La figure 3.1 montre un rotor portant des palettes, lesquelles sont poussées par des ressorts contre le stator. Les admissions et refoulements se font à travers le stator.

La figure 3.2 est un détail issue de la figure 3.1 qui montre la conception de deux couples admission/refoulement.

- 5 La seule contrainte particulière liée à ces pompes est de plaquer les palettes contre le stator, essentiellement pour le démarrage : on ne peut pas compter sur la force centrifuge puisque ces pompes ne sont pas entraînées par un moteur extérieur. Ici, ce sont des ressorts qui remplissent cette fonction.
- 10 La cylindrée est définie par les dimensions des arcs de cylindre encadrant les pentes de refoulement, et par la largeur du stator. Nous avons représenté un rotor de 45 mm de diamètre portant 40 palettes.

La pompe dessinée a les caractéristiques suivantes :

Cylindrée :  $8 \times 3730 \text{ mm}^3$

- 15 Débit théorique : 1 l/min à 270 tr/min par orifice

### **3.3 Stator avec plusieurs refoulements par admission**

- La figure 3.3 montre une pompe à palette avec trois orifices de refoulement pour un orifice d'admission. Le rotor (identique à celui de la figure 3.1) porte les palettes poussées par les ressorts contre le stator.
- 20

La figure 3.4 est un détail issu de la figure 3.3 montrant la conception d'un secteur angulaire admission/refoulement.

Ici, nous avons choisi de conserver les dimensions du stator et d'avoir les mêmes cylindrées pour chaque refoulement. Ce qui donne :

- 25 Cylindrée :  $15 \times 1245 \text{ mm}^3$
- Débit théorique : 0,33 l/min à 270 tr/min par orifice

Pour un même encombrement, le stator permet d'alimenter plus de récepteurs, mais à un débit moindre. Il permet aussi de différencier facilement les débits des récepteurs, conformément à la figure 3.5.

5 La figure 3.5 montre une batterie de six pompes volumétriques réversibles. Les six pompes sont identiques, elles débitent chacune un même débit. Deux pompes alimentent le même récepteur, une alvéole hydrostatique. Les trois pompes suivantes alimentent une deuxième alvéole hydrostatique. Le débit issu de la dernière est renvoyé au bac.

Cette configuration permet d'avoir un rapport de débit de 2/3 entre alvéoles en employant des pompes standards. Elle serait cependant jugée « idiote » dans la plupart des cas : plutôt que d'installer six pompes, il vaut mieux en installer deux en adaptant les cylindrées.

Mais si la batterie de pompe est une pompe à palette à refoulement multiple, comme décrite dans les figures 3.1 ou 3.3, cette configuration prend tout son sens. D'ailleurs, avec leur multitude de petite cylindrées, les pompes ayant plusieurs refoulement par admission sont plus adaptées à cette configuration.

Nous avons là une possibilité à une possibilité de réaliser les différents réglages par variation des rapport de cylindrée, comme décrit aux paragraphes §1.4.1 et §2.3.2., tout en utilisant des pompes standard.

### **3.4 Asservissement de débit**

Les liaisons à report de pression ne reposent pas sur un asservissement des pompes, mais d'autre applications peuvent l'exiger. Nous pensons particulièrement aux liaisons hydrostatiques alimentées à débit constant.

Pour les pompes volumétriques, la vitesse de rotation du rotor est représentative du débit. Le plus simple est alors d'asservir la vitesse de rotation, en pilotant la pression. Cette solution est décrite par la figure 3.6.

La figure 3.6 montre une batterie de quatre pompes volumétriques réversibles. La pression du réseau est modifiée par une résistance hydraulique réglable. La vitesse de rotation des pompes est mesurée par un tachymètre accouplé sur l'axe.

- Le pilotage du débit se fait par asservissement de la vitesse de rotation des pompes.
- 5 Cette vitesse de rotation est pilotée par la pression d'alimentation, laquelle est gérée par la résistance réglable.

Le pilotage en pression a l'avantage de limiter le nombre d'éléments : une seule mesure et un seul actionneur pour un nombre illimité de pompe. Il n'est possible qu'avec les pompes volumétriques réversibles.

#### 4 Conclusion

Les liaisons à report de pression ont été inventées dans le cadre des guidages de machines outils. Cette application réclame des liaisons agissant dans n'importe quelle configuration spatiale, sous des cas de charge variables en intensité comme en direction. Les contraintes majeures sont le positionnement, la rigidité et l'amortissement. Les liaisons à report de pression répondent parfaitement à ces contraintes.

Tout d'abord, le phénomène de report de pression repose sur l'opposition des alvéoles. Les liaisons à report de pression sont automatiquement préchargées. Elle sont utilisable en lieu et place des solutions mécaniques, tels les guidages rail-patins ou les roulement à contact obliques.

La très forte rigidité permet de concevoir des guidages compacts, de surface réduite. En particulier, des paliers de diamètre plus faible. Cela permet de concevoir des broches tournant plus vite en améliorant le rendement.

Du fait du report de pression, les alvéoles ne travaillent pas l'une contre l'autre. Au contraire, les alvéoles déchargées « soutiennent » les alvéoles chargées. De ce fait, il est possible de concevoir des guidages où les surfaces en oppositions ne sont pas équivalentes. On peut alors concevoir des glissières ayant une grande surface libre pour les fixations, tout en ayant une grande surface hydraulique. On peut aussi prendre en compte une charge sans amovible.

L'absence de résistance hydraulique sur le circuit d'alimentation autorise la maîtrise de la température du fluide hydraulique. C'est important pour garantir le comportement de la liaison. Ça l'est aussi pour empêcher la dilatations des pièces. Nous rappelons à ce propos que le moindre changement de température signifie une variation de cote de plusieurs microns. Ce qui n'est pas gênant en mécanique générale, mais rédhibitoire pour des usinages de haute précision.

Par rapport aux alimentations à débit constant, le progrès vient des diviseurs de débit. L'utilisation de pompes à palettes, ayant plusieurs orifices de refoulement distincts, permet d'alimenter une multitude de récepteurs en maintenant un encombrement minimum. Ces pompes sont assez compact pour être embarquées sur les éléments mobiles de machine outil. Même si ce n'est pas utile dans le cadre du report de pression, il est facile d'asservir le débit de ces pompes en pilotant la vitesse du rotor en fonction de la pression.

Du fait des opposition d'alvéoles, le jeu de fonctionnement est dissocié de la pression d'alimentation. Le point de fonctionnement est déterminé par une loi de comportement et la charge extérieures. La raideur est proportionnelle à la surface des alvéoles, à la pression d'alimentation et inversement proportionnelle au jeu de fonctionnement.

5 Il existe plusieurs manières de régler la position de fonctionnement d'une liaison, y compris après le mise en service. Nous ne sommes tributaire de la précision de fabrication des pièces mécaniques.

10 Il est possible de connecter plusieurs liaisons, c'est à dire d'accoupler les pompes. Dans le cadre d'un positionnement, cela n'a pas d'influence notable. Tout au plus, la rigidité et le débit varient moins en fonction de la position.

Lors de l'étude, nous n'avons pas évoqué le moment de rappel des alvéoles en réaction à une rotation. D'une part parce que dans l'esprit d'un positionnement, une rotation est proscrite. Ensuite parce que notre invention ne change pas le comportement de l'alvéole :  
15 elle porte sur le mode d'alimentation. Enfin parce que l'augmentation de rigidité autorise des guidages particulièrement compact : une alvéole de petite dimension a nécessairement un moment de rappel faible.

Pour contrer un moment de flexion, il nous paraît préférable de placer deux liaisons écartées, plutôt qu'une seule de grande longueur. Un guidage se conçoit alors comme une  
20 série de butées à double effet, chacune étant chargée d'empêcher un déplacement linéaire en un point précis. Par exemple, un palier se conçoit comme deux butées à double effet disposée perpendiculairement.

25 Les liaisons à report de pression ont été développées dans le cadre des machines d'usinage, mais elle ne se limite nullement à ce domaine. Notre invention reste une solution de guidage, au sens général du terme. Elle s'applique à tout mécanisme exigeant un positionnement partiel ou complet d'un sous ensemble par rapport à un autre. L'homme de métier agira sur les paramètres dont nous avons décrit les effets, pour élaborer une solution conforme à ses attentes.

## **Revendications**

1. Liaison hydrostatique à report de pression, caractérisé en ce que chaque alvéole composant la liaison est alimentée par un moteur/pompe volumétrique et réversible, que toutes les moteur/pompes sont accouplés en rotation et que les alvéoles soient disposées de telle sorte que leurs efforts s'opposent et s'équilibrent afin de guider un sous ensemble par rapport à un autre selon au moins un degré de liberté.
2. Liaison hydrostatique selon revendication 1, caractérisée en ce que les alvéoles s'opposant à un déplacement soient plus nombreux que ceux s'opposant au déplacement inverse.
3. Liaison hydrostatique selon revendication 1, caractérisée en ce que les alvéoles s'opposant à un déplacement soient de plus grande surface que ceux s'opposant au déplacement inverse.
4. Liaison hydrostatique selon revendication 1, caractérisée en ce que la position d'équilibre du sous ensemble guidé est modifiée par la modification de la cylindrée des moteur/pompes alimentant les alvéoles s'opposant à déplacement par rapport à la cylindrée des moteur/pompes d'alimentation des alvéoles s'opposant au déplacement inverse.
5. Liaison hydrostatique selon revendication 1, caractérisée en ce que la position d'équilibre du sous ensemble guidé est modifiée par la modification de l'écoulement du fluide à travers les alvéoles s'opposant à déplacement par rapport à l'écoulement du fluide hydraulique à travers les alvéoles s'opposant au déplacement inverse.
6. Liaison hydrostatique selon revendication 1, caractérisée en ce que la position d'équilibre du sous ensemble guidé est modifiable après mise en service, au moyen d'au moins un diviseur de débit réglable installé entre une alvéole de la liaison et sa pompe d'alimentation, de sorte à être capable de diminuer le débit d'alimentation en

fluide de cette alvéole.

7. Connexion de liaison hydrostatiques à report de pression selon l'une quelconque des revendication 1 à 6, caractérisée en ce que les moteur/pompes de plusieurs liaisons hydrostatiques à report de pression soient toutes liées en rotation.

8. Connexion de liaison hydrostatiques à report de pression selon revendication 7, caractérisée en ce que la cylindrée des moteur/pompes alimentant les alvéoles d'une liaison est modifiée par rapport à la cylindrée des moteur/pompes alimentant les alvéoles des liaisons qui lui sont connectées.

9. Connexion de liaison hydrostatiques à report de pression selon revendication 7, caractérisée en ce que l'écoulement du fluide hydraulique à travers les alvéoles d'une liaison est modifiée par rapport à l'écoulement du fluide hydraulique à travers les alvéoles des liaisons qui lui sont connectées.

10. Pompe à palette à refoulement multiple selon revendication 11, 12 ou 13, caractérisée en ce qu'elle alimente une ou plusieurs liaisons hydrostatiques à report de pression selon l'une quelconque des revendication 1 à 9.

20

11. Pompe à palette à refoulement multiple selon la revendication 10 caractérisée en ce que la pompe présente deux ou plusieurs orifices de refoulement, et que ces orifices alimentent au moins deux récepteurs hydrauliques.

12. Pompe à palette à refoulement multiple selon la revendication 10 ou 11, caractérisée en ce qu'elle présente plus d'orifice de refoulement que d'orifice d'admission.

25

13. Pompe à palette à refoulement multiple selon revendication 10, 11 ou 12, caractérisée en ce que les multiples débits de refoulement sont réglés en asservissant la vitesse de rotation du rotor, laquelle est pilotée par la pression d'admission.

30

1/12

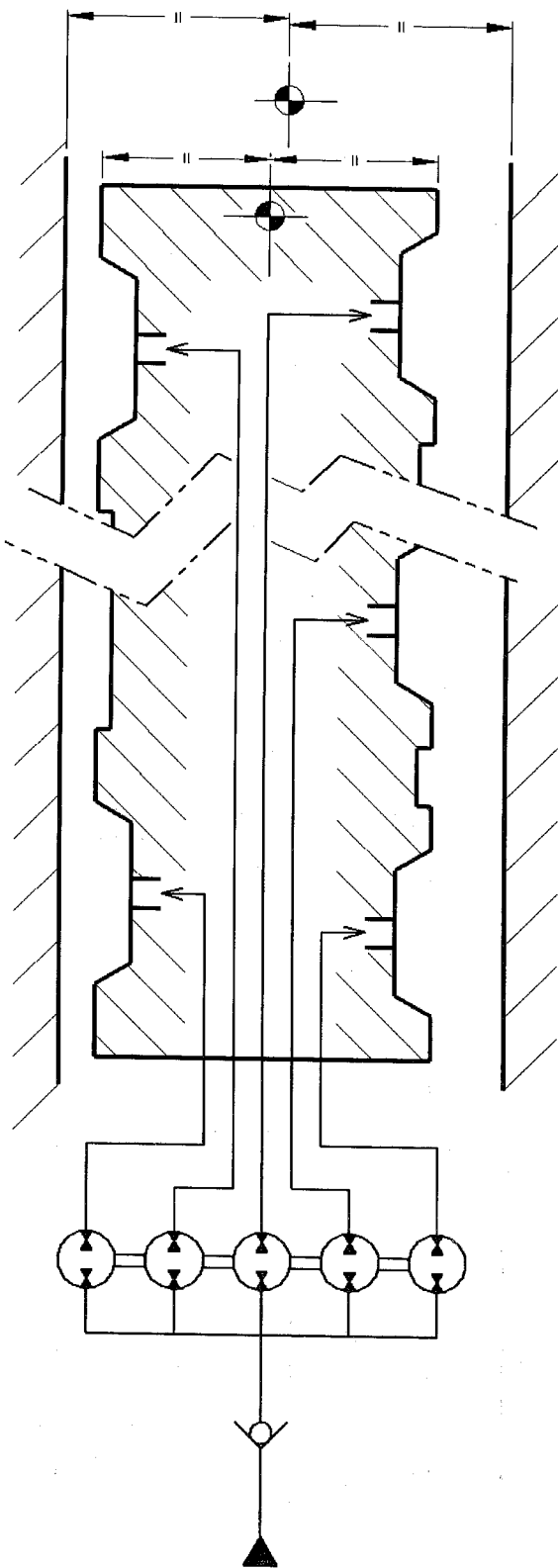


Figure 1.1

2/12

Figure 1.2

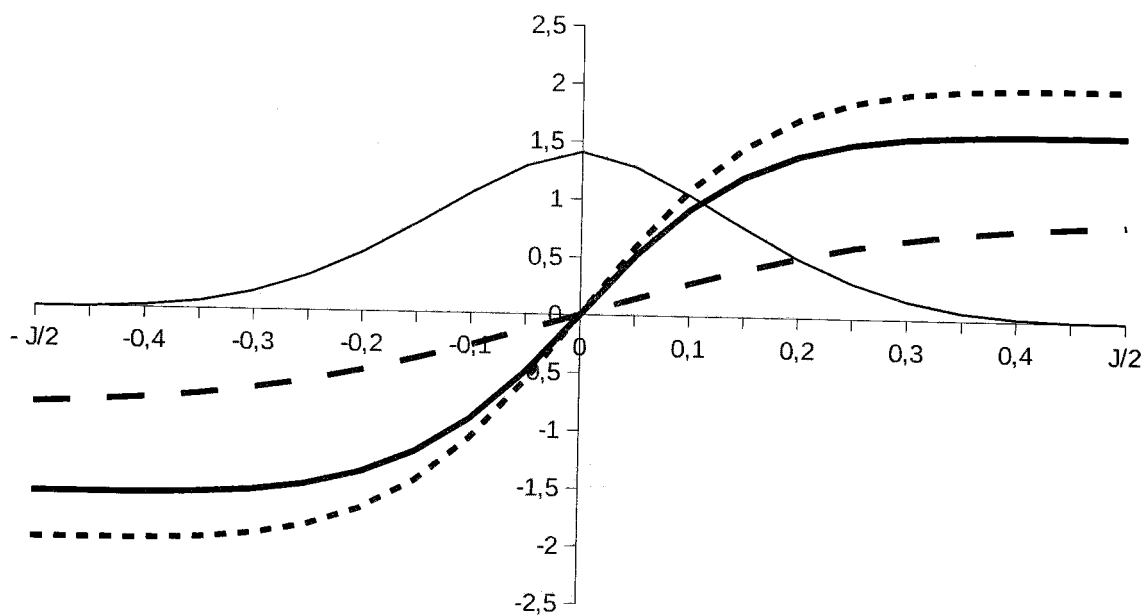
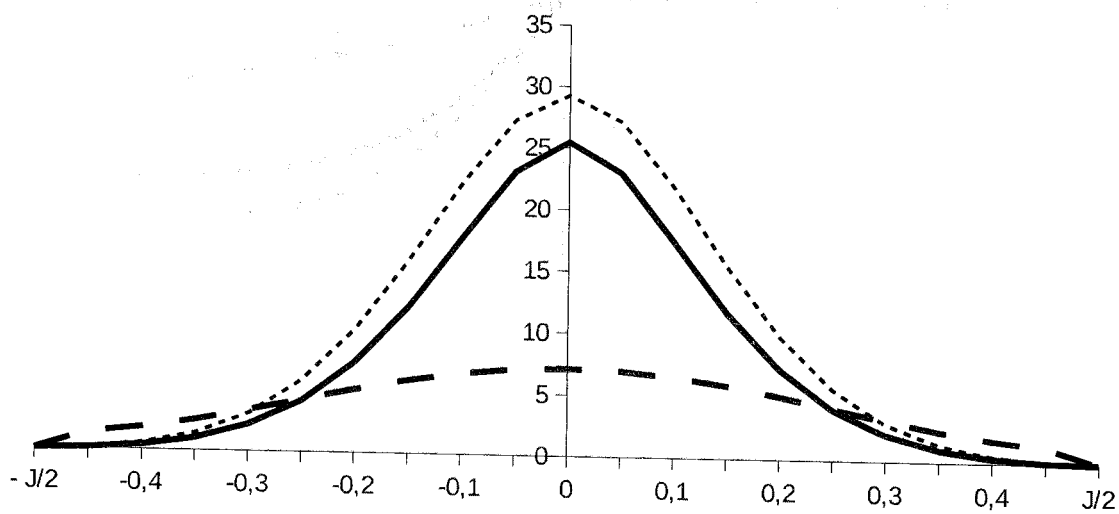


Figure 1.3



3/12

Figure 1.4

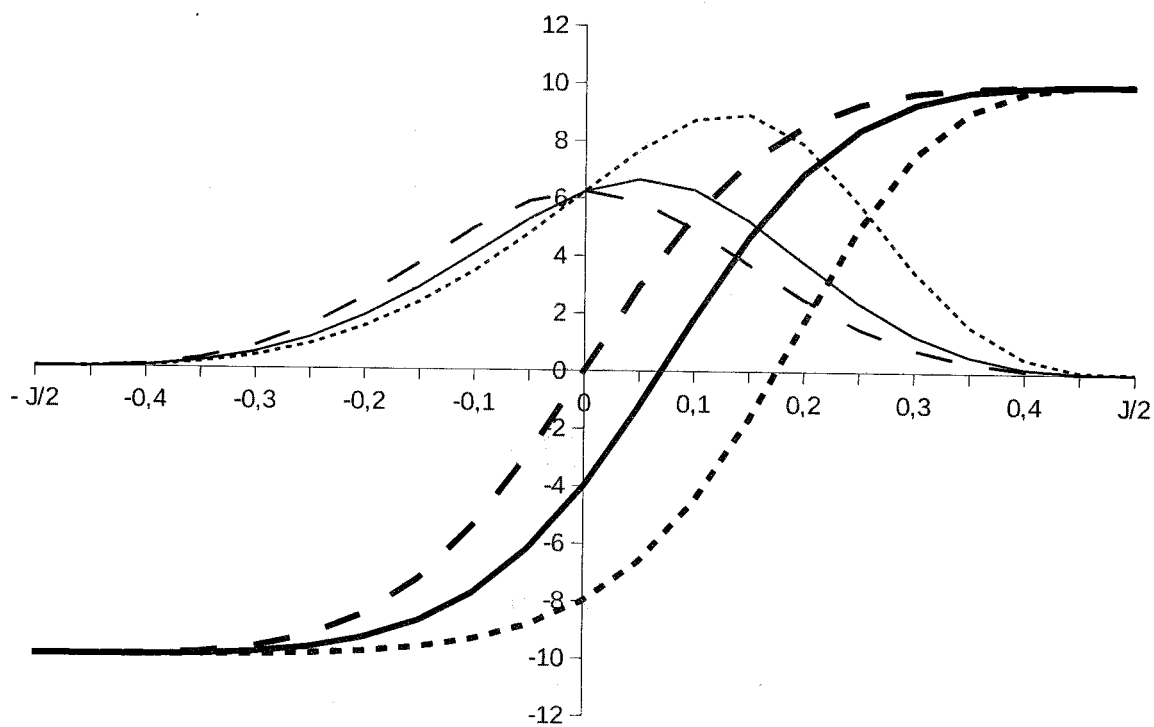
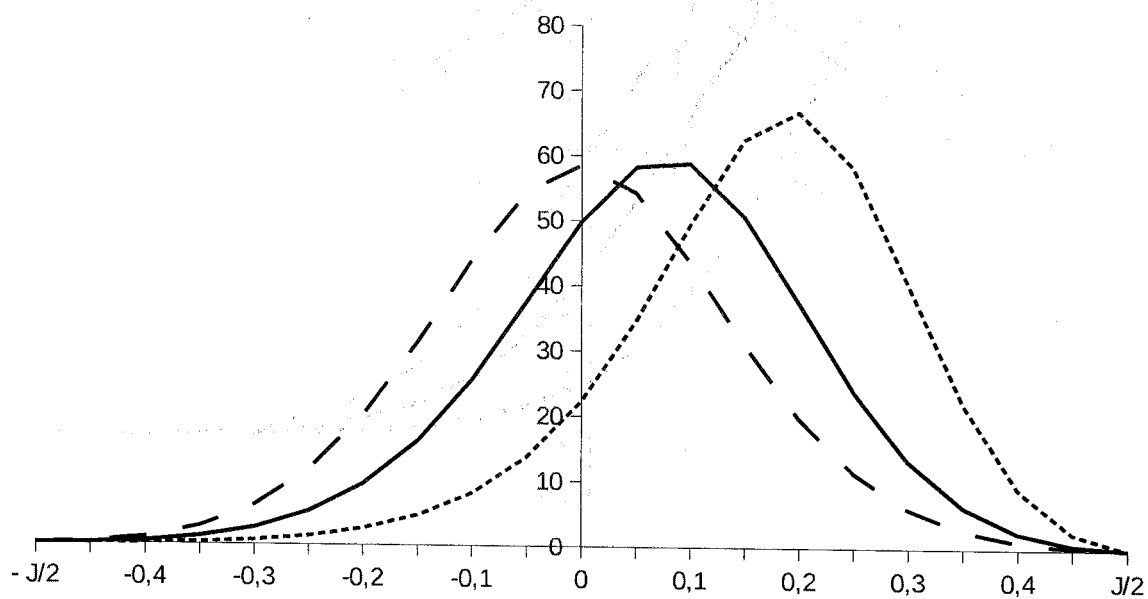


Figure 1.5



4/12

Figure 1.6

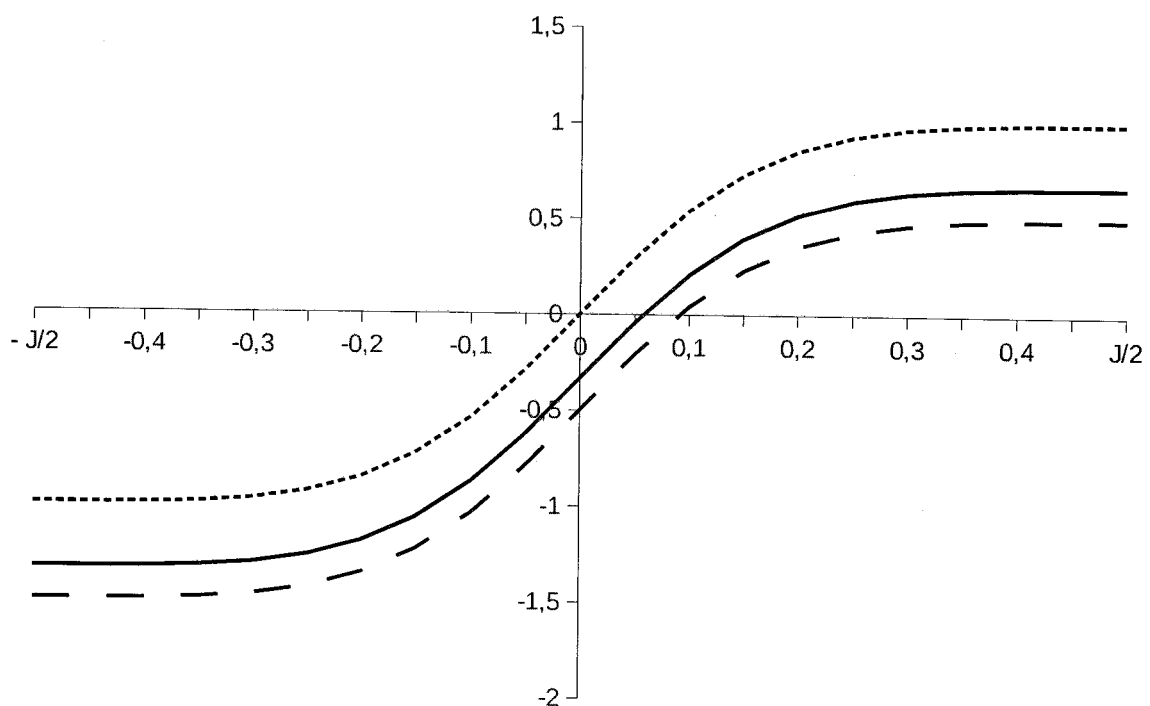
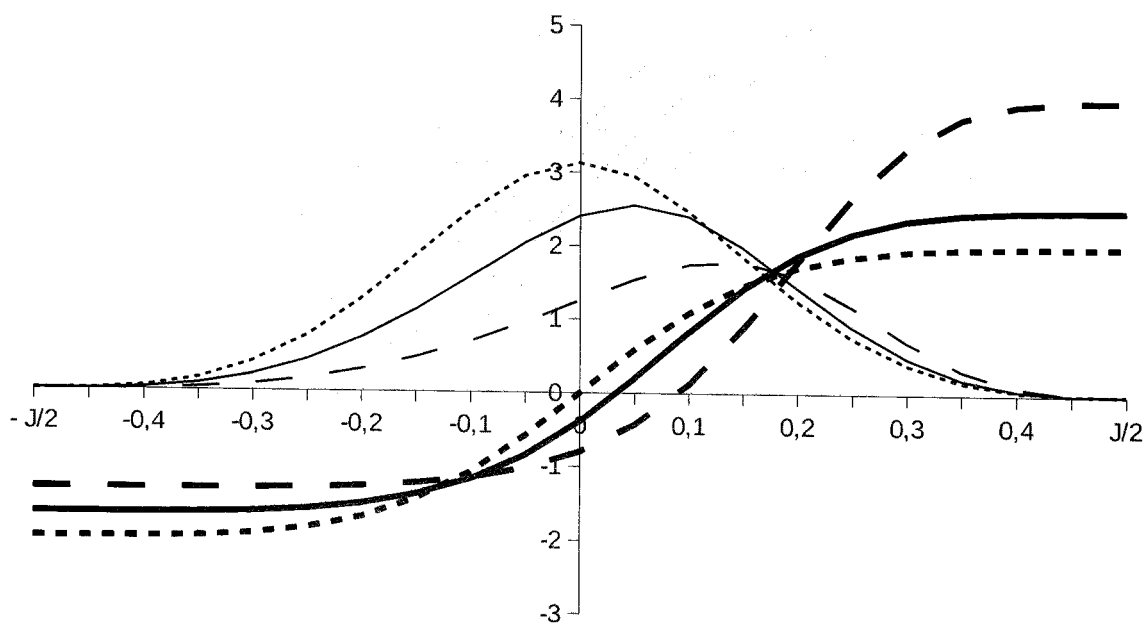


Figure 1.7



5/12

Figure 1.8

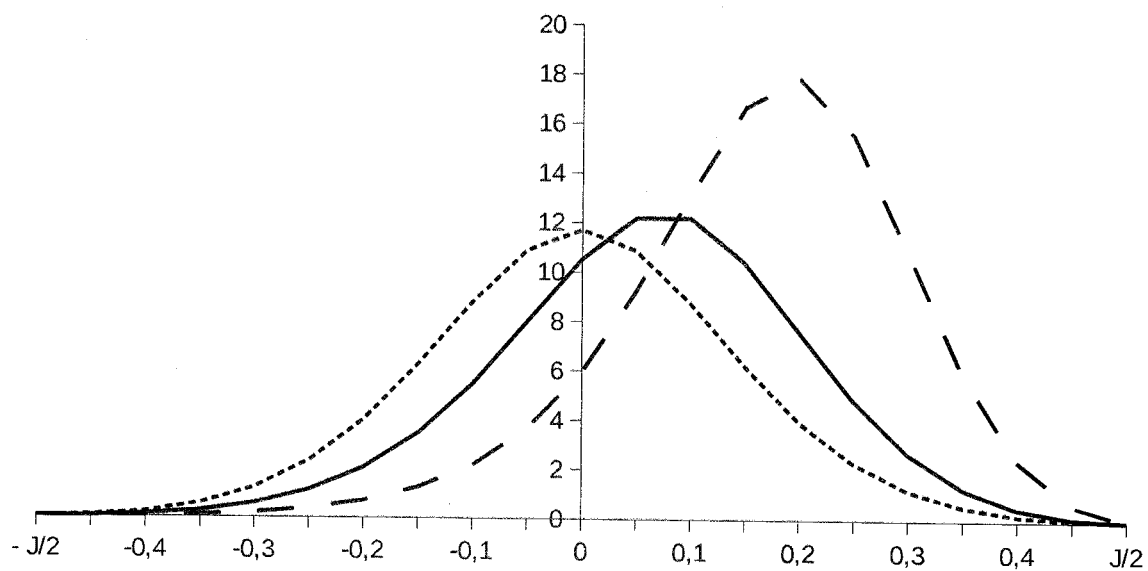
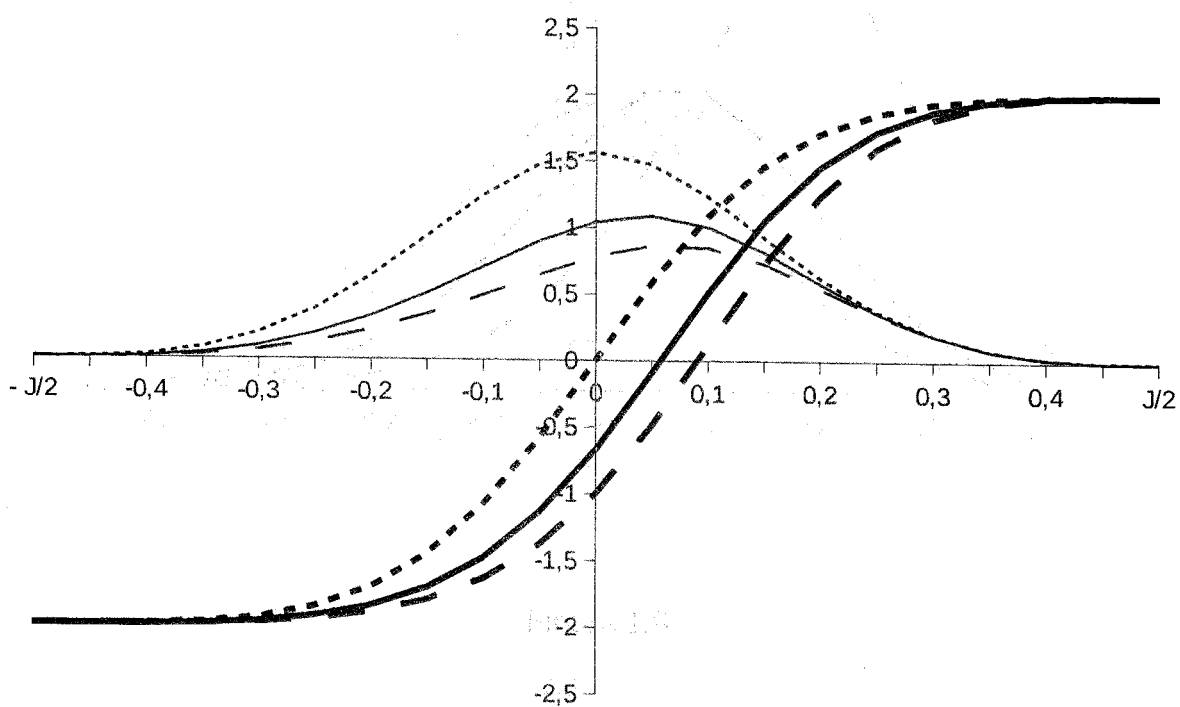


Figure 1.9



6/12

Figure 1.10

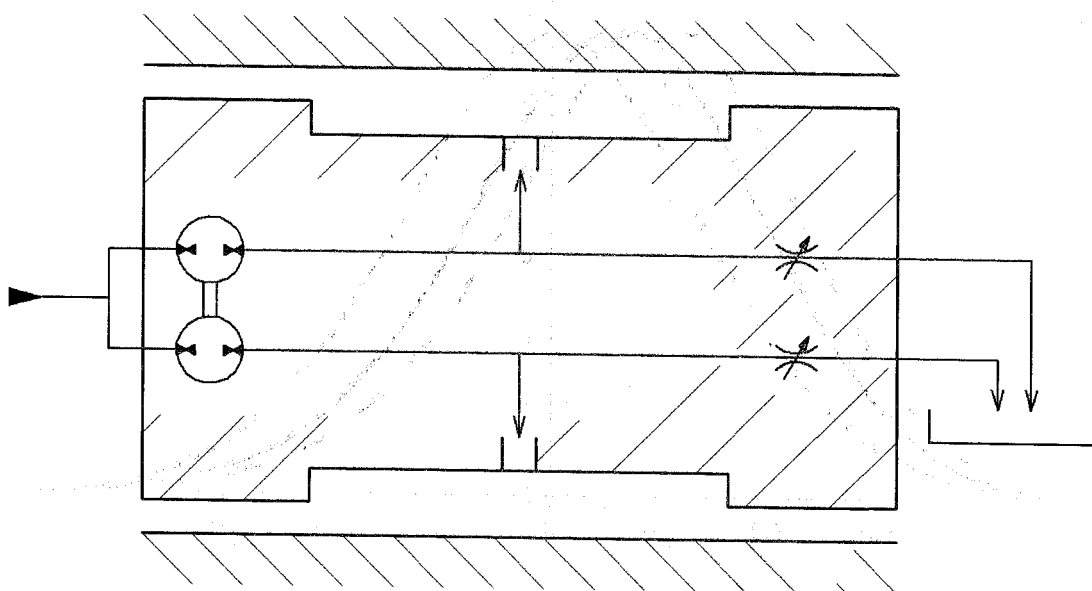
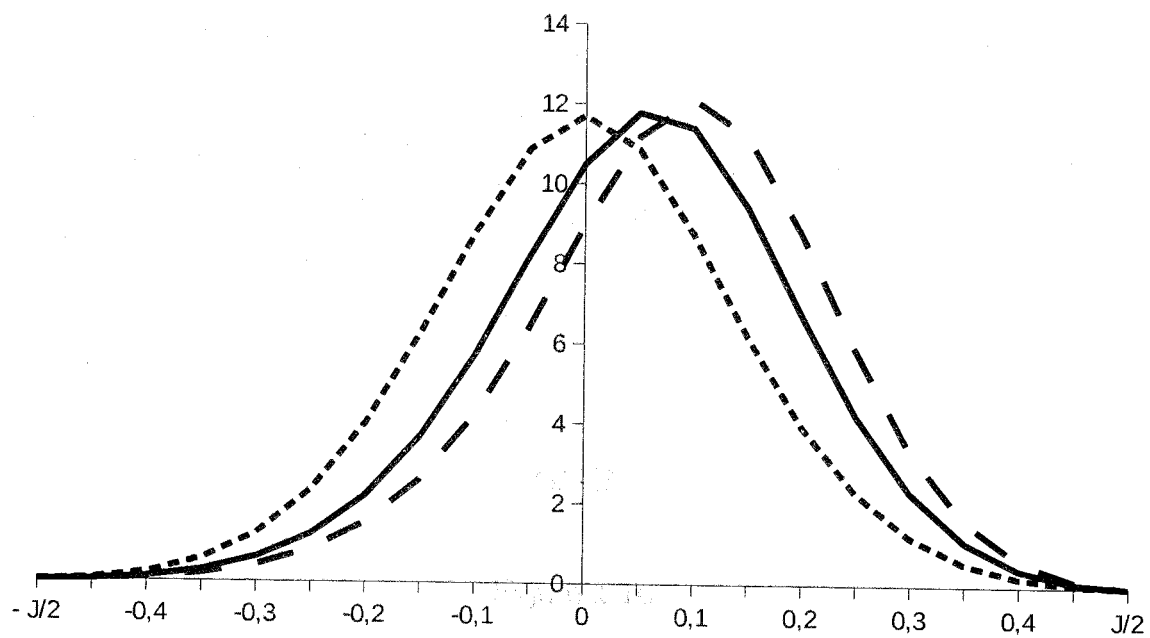


Figure 1.11

7/12

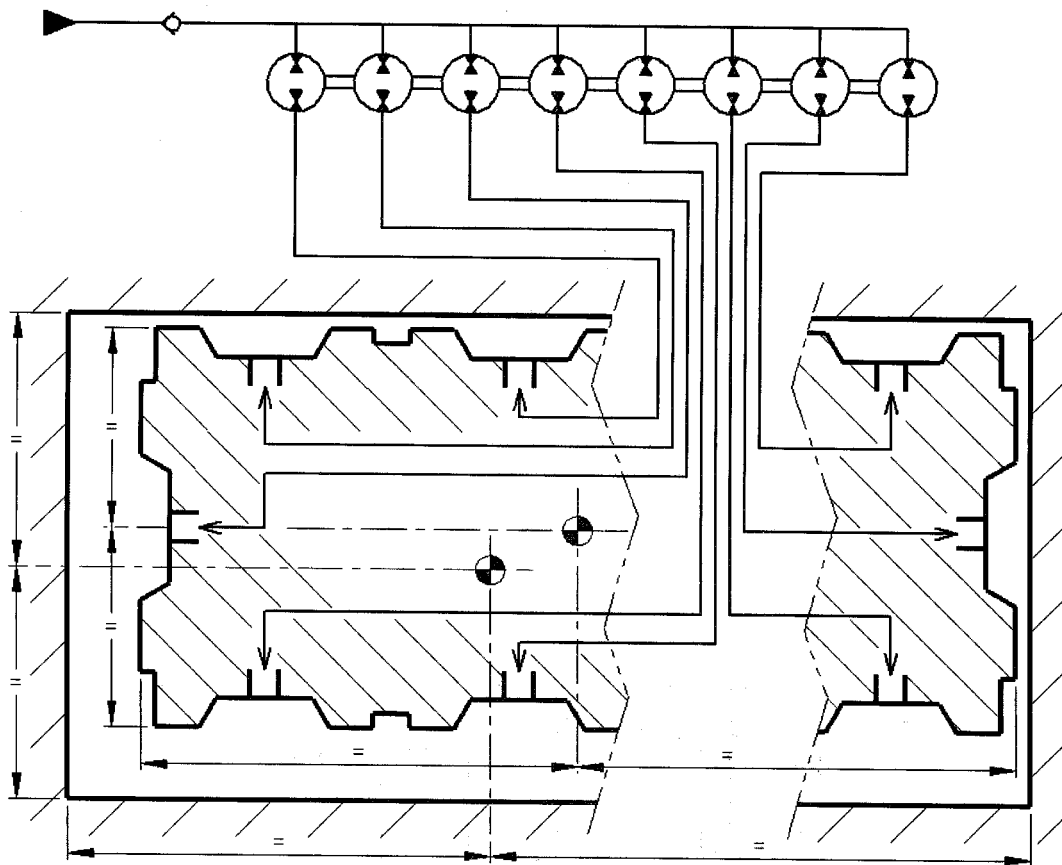


Figure 2.1

8/12

Figure 2.2

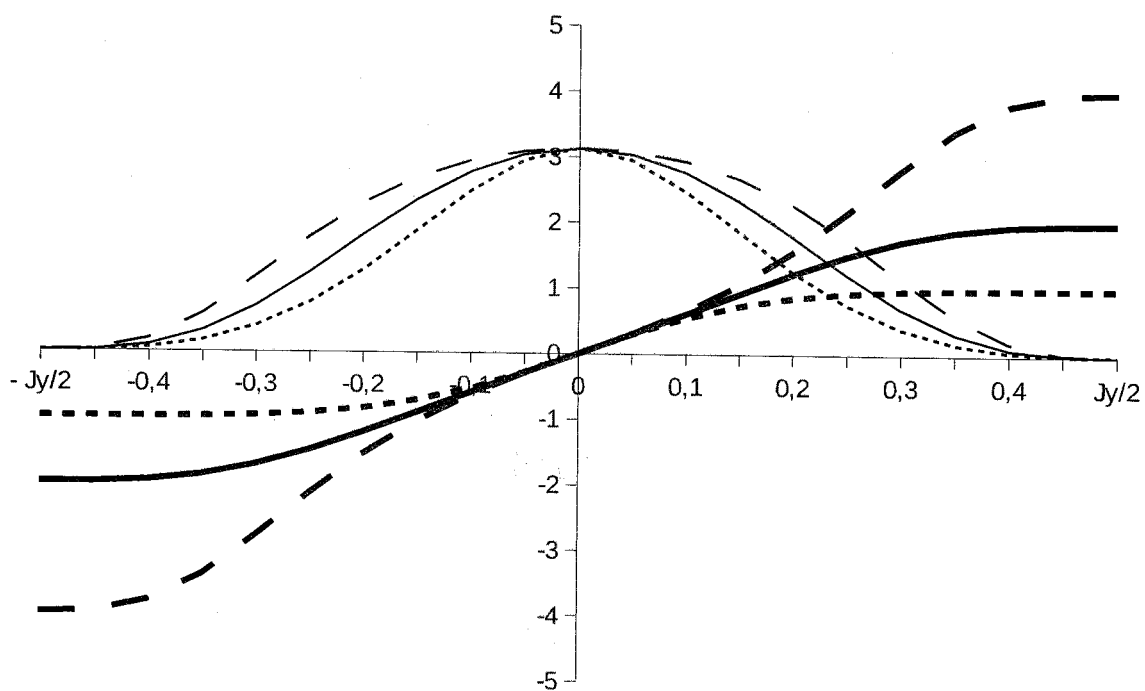
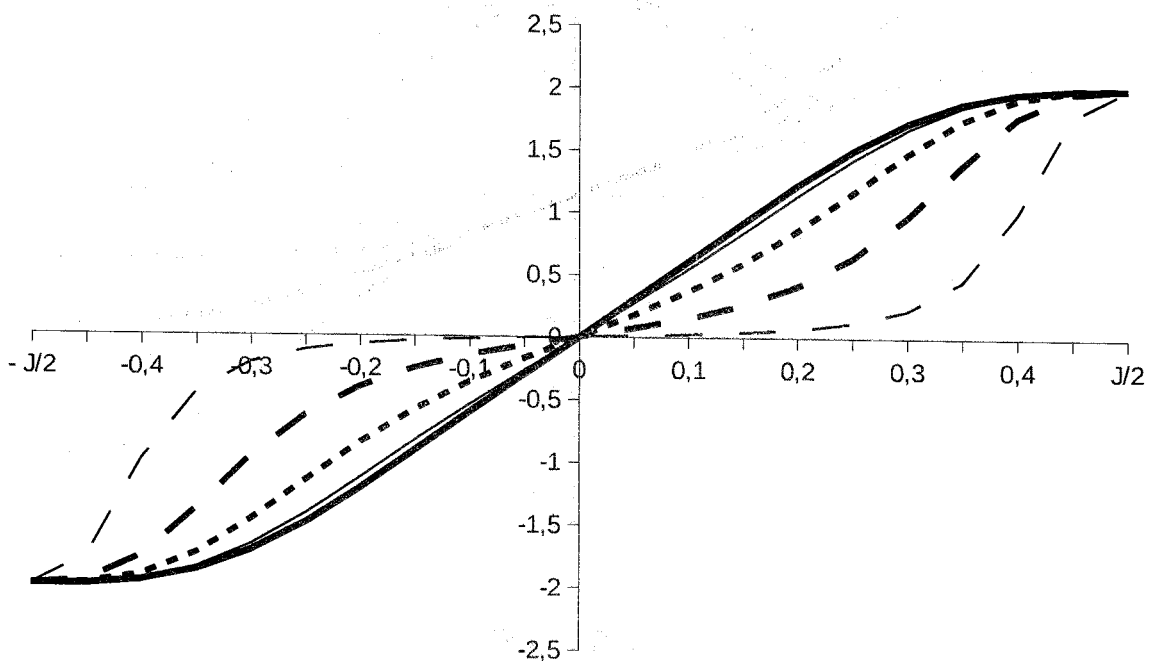
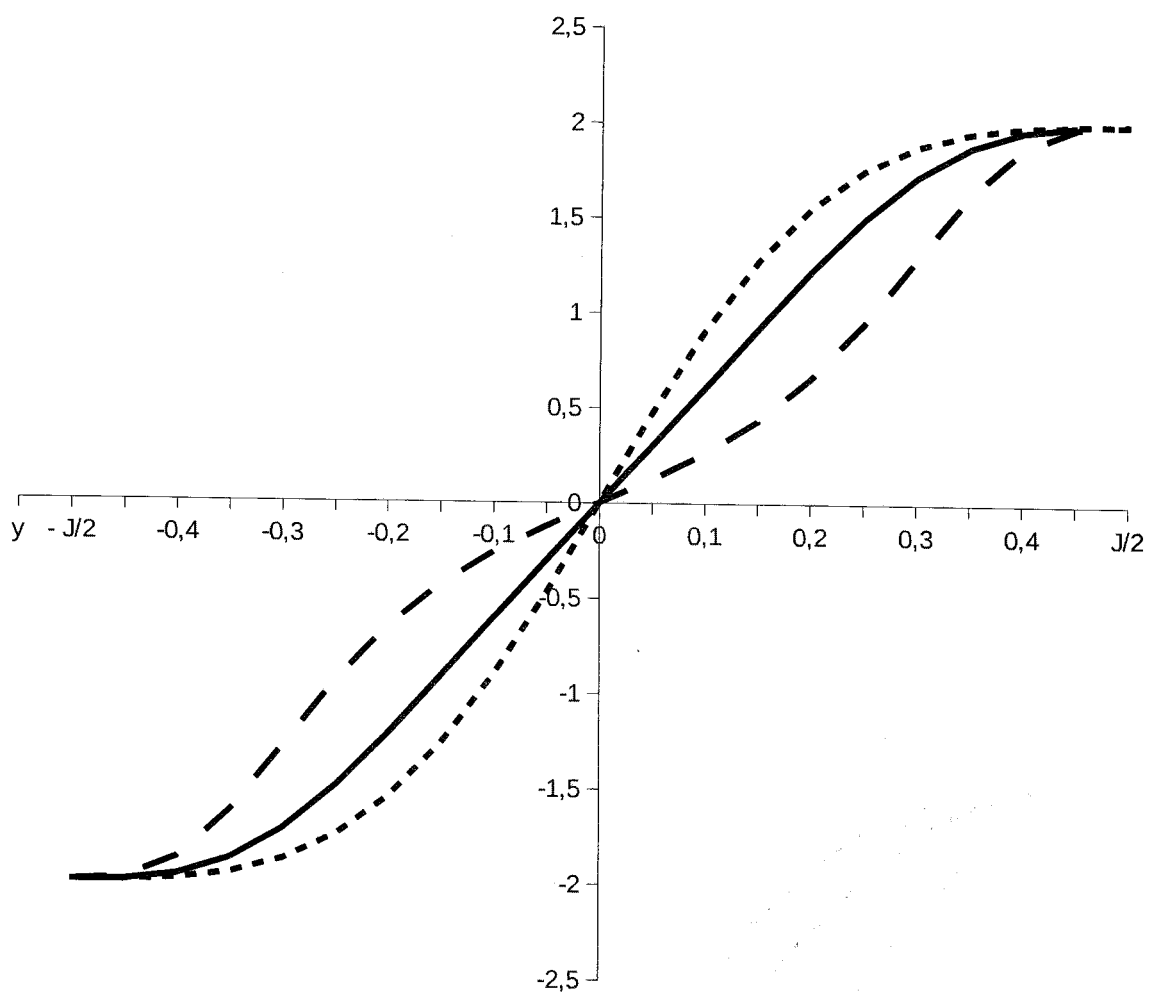


Figure 2.3

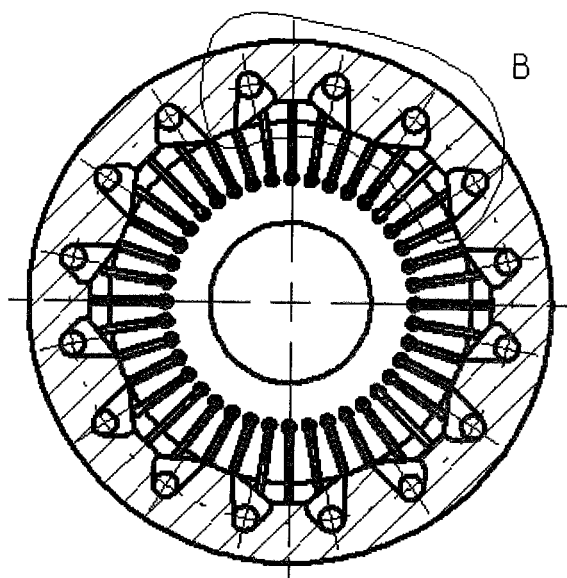


9/12

Figure 2.4

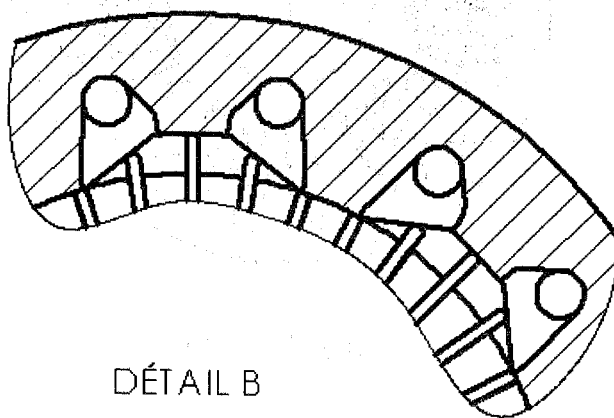


10/12



COUPE A-A

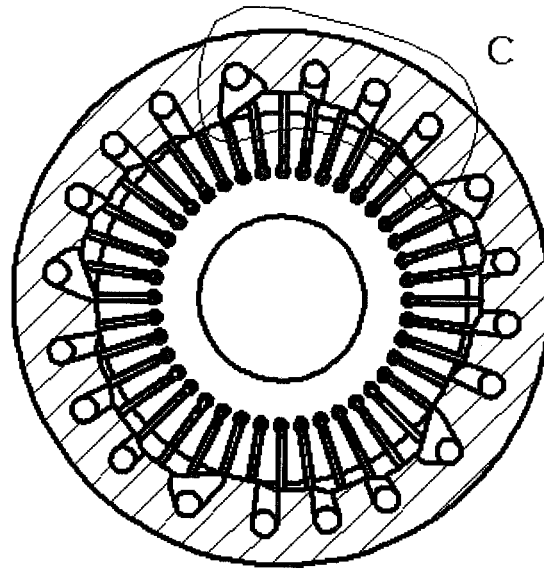
Figure 3.1



DÉTAIL B

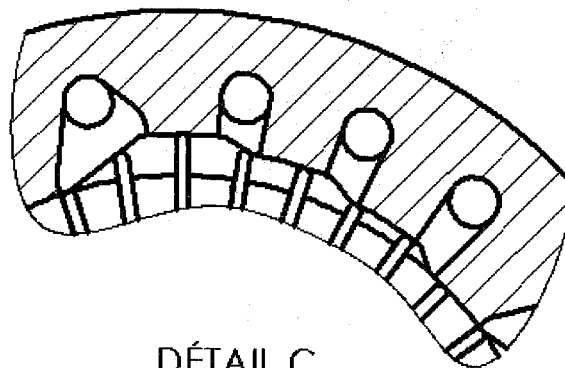
Figure 3.2

11/12



COUPE A-A

Figure 3.3



DÉTAIL C

Figure 3.4

12/12

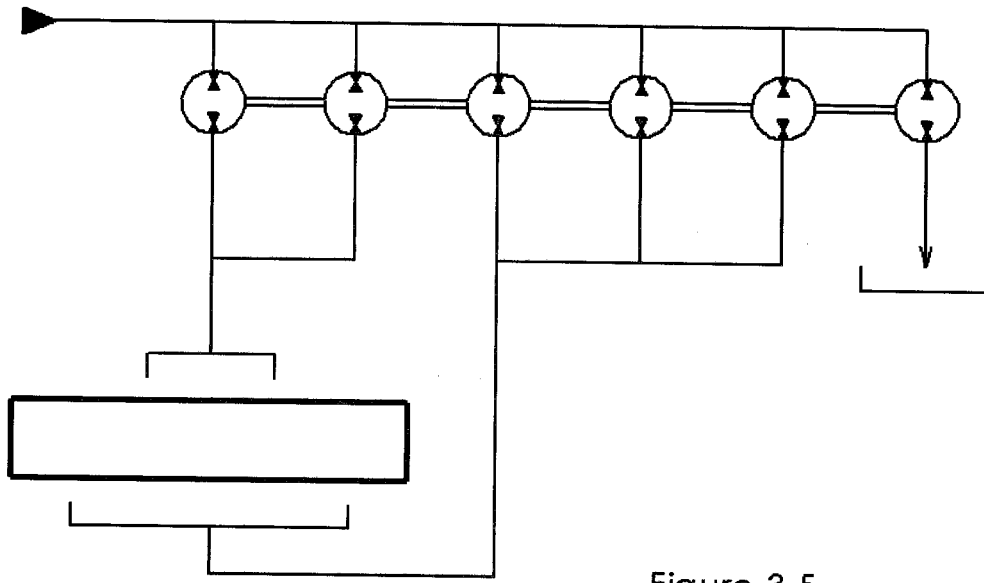


Figure 3.5

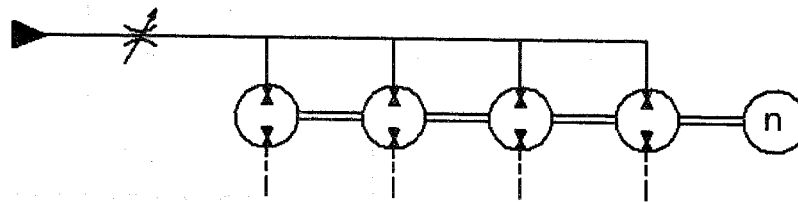


Figure 3.6



**RAPPORT DE RECHERCHE  
PRÉLIMINAIRE**

établi sur la base des dernières revendications  
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement  
national

FA 818133  
FR 1500460

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	CA 1 144 586 A (KRUPP POLYSIUS AG) 12 avril 1983 (1983-04-12)	1-5,7-9	F16C32/06
Y	* page 2, ligne 1 - ligne 9; figures 1,4 * * page 8, ligne 27 - ligne 32 * * page 10, ligne 20 - page 11, ligne 17 * -----	6	
Y	EP 2 068 015 A2 (HYDAC INTERNAT GMBH [DE]) 10 juin 2009 (2009-06-10) * alinéa [0022]; revendication 1; figure 2 *	6,13	
X	FR 2 117 107 A5 (VOGEL WILLY FA [DE]) 21 juillet 1972 (1972-07-21) * page 2, ligne 11 - ligne 18; revendication 7; figure 1 *	1	
X	US 3 540 783 A (CUDNOHUFISKY SYLVESTER R) 17 novembre 1970 (1970-11-17) * colonne 2, ligne 8 - ligne 12; figures 1,6,7 * * colonne 2, ligne 30 - ligne 51 *	1	
X	EP 0 189 639 A1 (HOBOURN EATON LTD [GB]) 6 août 1986 (1986-08-06)	10-12	F04C F16C
Y	* page 1, ligne 3 - ligne 8; figure * * page 2, ligne 12 - ligne 28 *	13	
X	FR 2 834 317 A1 (LUK FAHRZEUG HYDRAULIK [DE]) 4 juillet 2003 (2003-07-04) * page 4, ligne 4 - page 5, ligne 14; figure 1 *	10,11	
		Date d'achèvement de la recherche	Examineur
		15 mars 2016	Descoubes, Pierre
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons ..... & : membre de la même famille, document correspondant	
X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire			

1

EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE  
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 1500460 FA 818133**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.

Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **15-03-2016**

Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
CA 1144586	A	12-04-1983	AUCUN	
EP 2068015	A2	10-06-2009	DE 102007058572 B3 EP 2068015 A2 ES 2416293 T3	02-04-2009 10-06-2009 31-07-2013
FR 2117107	A5	21-07-1972	DE 2057707 A1 FR 2117107 A5 IT 942864 B JP S571684 B1	31-05-1972 21-07-1972 02-04-1973 12-01-1982
US 3540783	A	17-11-1970	AUCUN	
EP 0189639	A1	06-08-1986	EP 0189639 A1 US 4659296 A	06-08-1986 21-04-1987
FR 2834317	A1	04-07-2003	AU 2002363838 A1 DE 10259894 A1 DE 10297707 D2 EP 1461533 A1 FR 2834317 A1 WO 03056180 A1	15-07-2003 17-07-2003 17-02-2005 29-09-2004 04-07-2003 10-07-2003