

### Consignes

La durée de l'épreuve est de 3 heures. Le poids des parties est donné à titre indicatif. Il est conseillé de lire intégralement l'énoncé et les annexes, puis de traiter le sujet dans l'ordre des questions. Chaque partie est toutefois indépendante. Sont autorisés : le photocopie, les impressions des présentations et les notes personnelles de cours et TD, calculatrice.

Toute réponse se doit d'être justifiée et concise.

**Le sujet est composé d'un document de 10 pages A4 regroupant l'énoncé et les annexes, et d'un document réponse de 10 pages A4. Le document réponse ne doit pas être dégrafé.**

**Toutes les réponses sont à faire sur le document réponse uniquement.**

### 1. Présentation

Les pompes étudiées dans ce sujet sont des pompes volumétriques à pistons ou à membranes pour le dosage et l'injection de fluide.

- Débit : jusqu'à 50l/h, sous 159 bar
- Pressions : jusqu'à 440 bar pour 18l/h
- Débit réglable de 0 à 100% en marche ou à l'arrêt
- Longueur maximale de course : 21mm
- Poussée maximale : 500daN
- Puissance maximale de moteur 1.1 kW



Figure 1 : pompe à membrane pour la dépollution

Ces pompes, de par leur conception robuste et fiable sont actuellement utilisées dans l'industrie chimique et nucléaire pour le dosage, l'injection et le transfert de fluides dangereux et difficiles : corrosifs, abrasifs, toxiques, explosifs, radioactifs, ...

Ces caractéristiques sont précisément celles qui sont recherchées dans les activités de dépollution et de retraitement des fluides dangereux issues par exemple du domaine minier. Une nouvelle conception est envisagée intégrant l'éco-conception afin d'être plus cohérent avec l'objectif environnemental du produit. Une première analyse environnementale a donc permis de définir la criticité des différents aspects environnementaux (selon NF EN 15624) :

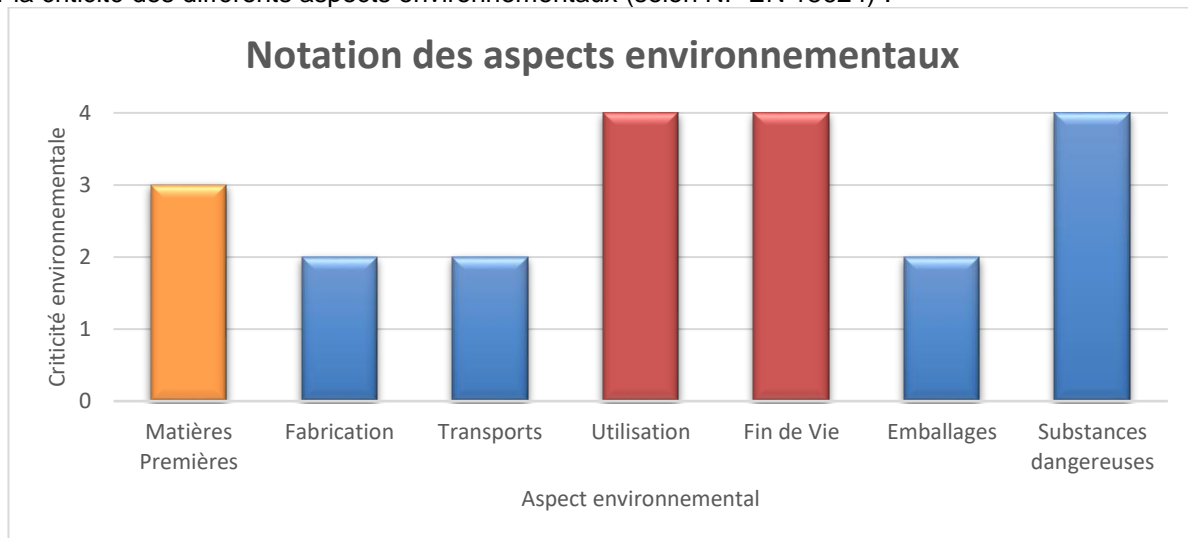


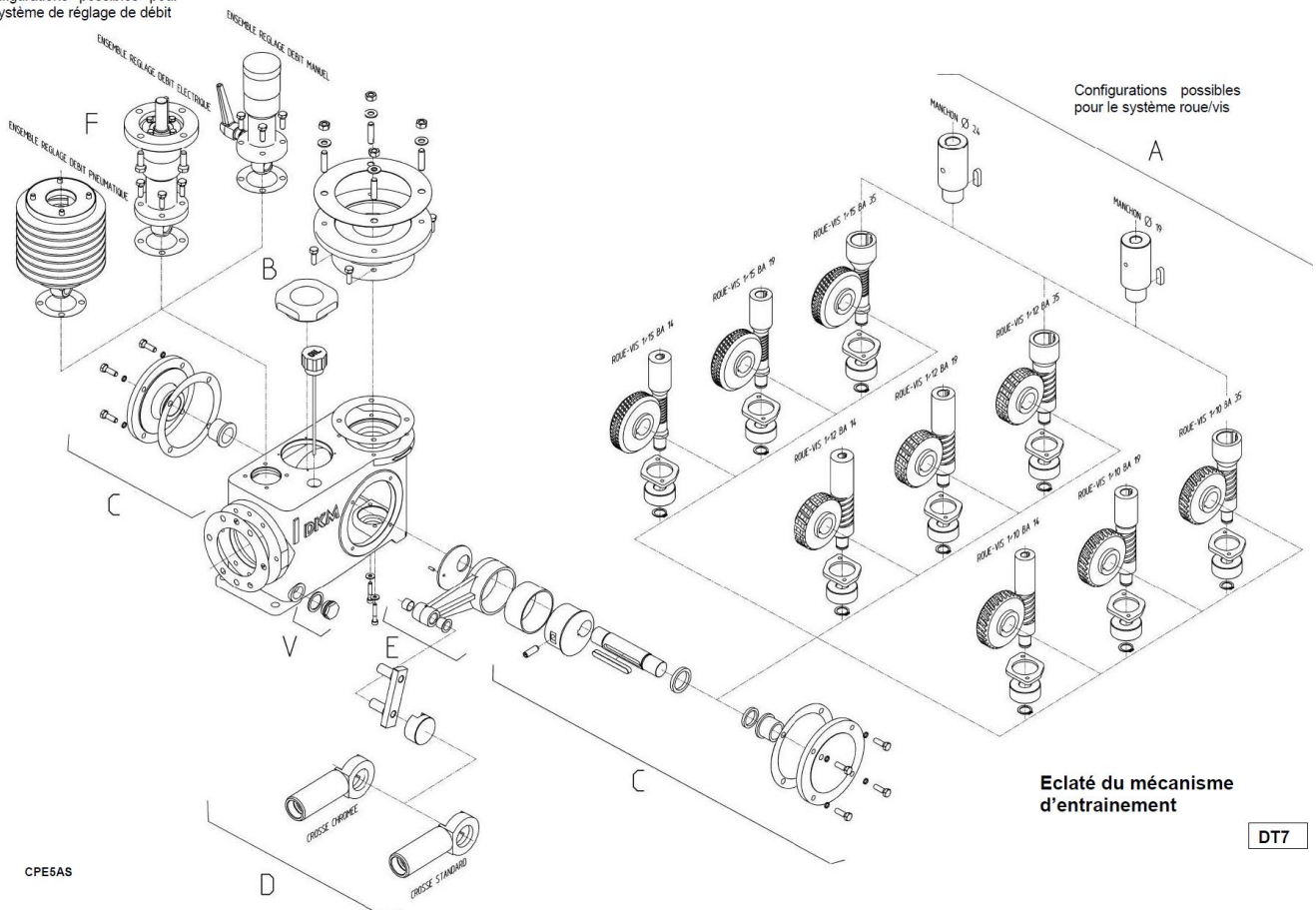
Figure 2 : Analyse environnementale de la pompe

Cette analyse permet de cibler des stratégies environnementales pertinentes. Il s'avère que le matériel existant satisfait déjà des stratégies d'éco-conception comme :

- Utilisation Travailler sur la structure modulaire du produit et son adaptabilité (partie 1 du sujet)
- Utilisation et Fin de Vie Concevoir en vue de faciliter la réutilisation du produit (robustesse, design)

Configurations possibles pour le système de réglage de débit

Configurations possibles pour le système roue/vis



**Figure 3 : application de la stratégie de structure modulaire. 2 à 7 pompes peuvent être combinées, avec doseur à membrane ou à piston.**

La nouvelle conception sera alors centrée sur 2 stratégies d'éco-conception choisies pour répondre aux problèmes de la phase d'utilisation :

- Améliorer la durabilité et la fiabilité du produit (partie 3, 4 et 5 du sujet)
- Améliorer l'efficacité énergétique (consommation/rendement) du produit (partie 6, 7 et 8 du sujet)

Bien que moins critique, une stratégie de réduction de l'impact carbone est aussi envisagée :

- Matière Première Utiliser des matériaux à moindre empreinte carbone

## 2. Compréhension du mécanisme

Le couple roue/vis entraîné par le moteur met en mouvement le système bielle/manivelle par l'intermédiaire d'un excentrique (16). Le porte-piston (8), rattaché à la glissière (13), est animé d'un mouvement linéaire alternatif. La cadence de fonctionnement dépend de la vitesse de rotation du moteur et du rapport du couple de réduction. Le moteur est monté sur un accouplement élastique. Un enjeu important de la longévité du système est une bonne conception du guidage en rotation de la vis 37 par rapport au carter 1.

**Question 1.** Identifier en rouge sur le document réponse DR1 les surfaces du carter qui participent directement ou indirectement au positionnement radial de la vis 37 par rapport au carter. Repérer ces surfaces GS6.

**Question 2.** Sur DR1, entourer en vert la surface permettant le positionnement axial de la bride 41 par rapport au carter 1. Entourer en bleu la surface permettant le positionnement axial de la vis 37 par rapport au carter 1.

**Question 3.** Préciser le type et les dimensions du roulement 29. Par quelle liaison peut-on modéliser le contact 37/1 ?

Le débit des pompes est réglable manuellement en standard par vis micrométrique avec un cadran étanche gradué de 0 à 100% de la course. Le réglage s'effectue par variation de la course du piston avec une précision inférieure à 1% de 10 à 100% du débit maximal. Pour une meilleure économie des produits dosés, les pompes peuvent tenir le débit nul. Le verrouillage du système permet de s'assurer de la constance du débit.

- Question 4.** Quelle est la fonction de la pièce 45 ?  
**Question 5.** Comment et par quelles pièces est assuré le blocage en rotation de la pièce 54 ? En déduire la liaison entre 54 et 51.  
**Question 6.** Indiquer sur le plan DR2 la cote de la course de réglage. Mesurer sur ce même plan la course de piston. L'échelle sera déduite des dimensions de pièces connues.

Un autre enjeu du système reste la simplicité de son montage, assurant une répétabilité importante de ses qualités fonctionnelles.

- Question 7.** Quelle est la fonction de la pièce 14 ?  
**Question 8.** Quelle est la fonction de la pièce 23 ?  
**Question 9.** Quelles sont les fonctions des pièces 24 et 25 ?

### 3. Amélioration de la fiabilité - cotation

Un problème récurrent des pompes actuelles est l'échauffement du guidage en rotation de la ligne d'arbre 15 dont le montage vient d'être étudié. Pour garantir la libre rotation de l'arbre 15 en fonctionnement ( $\approx 70^\circ\text{C}$ ), il faut imposer au montage un jeu minimal de 0,1 mm entre les pièces 11 et 26'.

- Question 10.** En vous aidant de l'annexe 3 : Calculer le jeu mini  $J_{A\ 11-26'}$ . La valeur sera donnée en  $\mu\text{m}$ . On pourra s'aider du plan d'ensemble du DR3 pour tracer une chaîne de cotes (*non évaluée*). **On indique par ailleurs que l'épaisseur des joints 9 et 9' est comprise entre 0,15 et 0,20 mm.** Y-a-t-il risque de serrage axial ? Comment remédier à ce problème ?

- Question 11.** Décoder la spécification du carter participant au positionnement du porte piston 8 à l'aide du tableau de décodage sur le document DR4
- |          |             |     |   |   |
|----------|-------------|-----|---|---|
| $\oplus$ | $\emptyset$ | tp3 | B | C |
|----------|-------------|-----|---|---|

### 4. Amélioration de la fiabilité – théorie des mécanismes

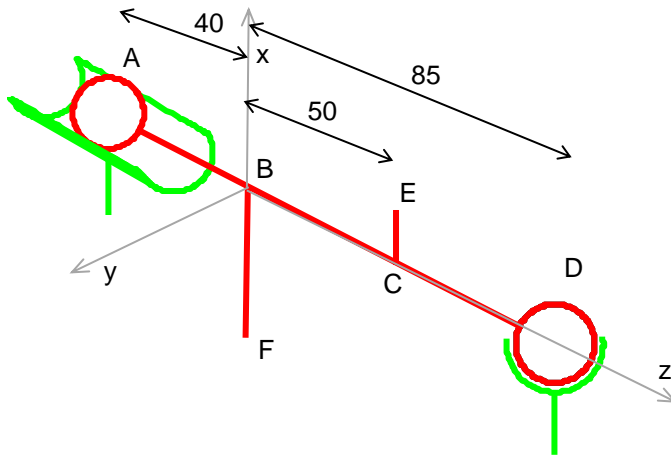
La mécanique des pompes est fiable grâce à un nombre limité de pièces en mouvement qui sont largement dimensionnées à partir d'un modèle cinématique fourni en annexe. D'un accès facile, ces pièces sont installées dans un carter étanche aux poussières et aux projections d'eau permettant des coûts de maintenance réduits.

- Question 12.** A l'aide du schéma cinématique minimal fourni en annexe, compléter le nom des liaisons manquantes sur le graphe de liaison du document DR5  
**Question 13.** Calculer le degré d'hyperstatisme global en vous basant sur le modèle cinématique qui vous est proposé en annexe.  
**Question 14.** Étude de la boucle de transformation de mouvement A : en commentant le rapport L/D entre la pièce 57 et la pièce 53 ainsi que le jeu radial, déduire un modèle de liaisons plus réaliste que le modèle actuel et assurant l'isostatisme de la boucle A. En déduire le nouveau degré d'hyperstatisme du mécanisme.  
**Question 15.** Étude de la boucle de transmission C : on précise que cette boucle est hyperstatique de degré 2, quelles conditions géométriques cela impose entre les liaisons de la bielle 7 ? Au regard de la réalisation technologiques de ces liaisons, quelle modification de modèle de liaison permettant d'obtenir l'isostatisme de la boucle C proposeriez-vous ?  
**Question 16.** Étude de la boucle D : indiquez le degré d'hyperstatisme de cette boucle.  
**Question 17.** En tenant compte de toutes les modifications de modèle précédentes, en déduire le degré d'hyperstatisme de la boucle B.

*Note : ce degré d'hyperstatisme est géré par la qualité de fabrication de la pièce 19 qui est de forme simple et permet ainsi une bonne fiabilité sans difficulté de montage.*

**5. Amélioration de la durabilité – statique et résistance des matériaux**

La pompe actuelle assure une durabilité par un dimensionnement large basé sur un coefficient de sécurité de 5. On se propose de vérifier la tenue mécanique de l'arbre 15. Pour cela on adoptera le modèle statique suivant :



La liaison en A modélise le contact du coussinet 26'. En F, c'est l'action de contact de la vis sans fin 37. En E est modélisée par une ponctuelle de normale y l'action de contact de la clavette 17. En D, c'est l'action de contact du coussinet 26.

On donne :

$$\mathfrak{S}_{37 \rightarrow 15} = \begin{Bmatrix} 694 & 0 \\ 1850 & 0 \\ 461 & 0 \end{Bmatrix}_F$$

La distance FB = 45 mm et CE = 16,5 mm

Les efforts sont donnés en Newton.

**Question 18.** Déterminer les actions mécaniques en A, E et D

Quels que soient les résultats de la question précédente on considèrera les actions mécaniques suivantes s'exerçant sur l'arbre 15 :

$$\mathfrak{S}_{37 \rightarrow 15} = \begin{Bmatrix} 694 & 0 \\ 1850 & 20,745 \text{ N.m} \\ 461 & -83,25 \text{ N.m} \end{Bmatrix}_B \quad \mathfrak{S}_{26' \rightarrow 15} = \begin{Bmatrix} -305 & 0 \\ -2670 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_A \quad \mathfrak{S}_{17 \rightarrow 15} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ 5045 & 0 \\ 0 & 83,25 \text{ N.m} \end{Bmatrix}_C \quad \mathfrak{S}_{26 \rightarrow 15} = \begin{Bmatrix} -389 & 0 \\ -4225 & 0 \\ -461 & 0 \end{Bmatrix}_D$$

**Question 19.** Déterminer les graphes des efforts de traction N1 et tranchants T2 et T3 ainsi que les moments de torsions M1 et de flexions M2 et M3, pour les 2 tronçons BC et CD. On constatera que le repère local est défini de la façon suivante :  $(\vec{l}_1, \vec{l}_2, \vec{l}_3) = (z, x, y)$

**Question 20.** La section la plus chargée est C-, calculer la contrainte équivalente de Von Mises au point le plus chargé de coordonnée  $(x_2 = 0 ; x_3 = r = 14 \text{ mm})$

**Question 21.** Le matériau actuel, du C35, a une limite élastique de 275 MPa. Conclure sur la durabilité de l'arbre. **A l'aide de votre polycopié**, proposer un acier non allié usinable répondant au cahier des charges.

**6. Amélioration de l'efficacité énergétique – coussinets et roulements**

La principale innovation dans la reconception de la pompe consiste à remplacer le moteur asynchrone par un moteur synchrone. Son meilleur rendement à basse vitesse permet d'envisager la suppression pure et simple de l'étage de réduction roue / vis sans fin dont le rendement faible nuit au bilan environnemental dans la phase d'usage. Dans la nouvelle configuration **l'arbre 15 est en prise directe sur le moteur synchrone et tourne à 400 tr/min au lieu des 170 tr/min d'origine**. La puissance moteur étant identique, l'effort est diminué par une réduction de la section du piston, sans diminution de pression. On considère alors que l'arbre 15 est soumis en C à une charge radiale de 2125 N et aux actions des deux paliers en A et D.

**Question 22.** Préciser si dans la disposition proposée les coussinets (26) Ø28-36-28 en bronze restent adaptés au chargement et à la vitesse de rotation.

**Question 23.** Pour des raisons de montage on décide de changer les coussinets 26 par des roulements à contact radial 6205 (Ø25-47-12) de capacité de charge dynamique C = 11200 N et statique C0 = 6550 N. **Les modèles de liaisons en A et D restent les mêmes qu'en partie 5.** Calculer la durée de vie du montage en millions de tours.

## **7. Amélioration de l'efficacité énergétique et empreinte carbone – choix du matériau de la bielle 7**

L'arbre 15 tournant plus rapidement il convient de limiter les inerties des pièces en mouvement. On s'intéresse donc à la bielle 7 dont la masse est relativement importante. Compte tenu de la fiabilité recherchée du système cette bielle doit assurer un fonctionnement en limitant les déformations sous charge.

**Question 24.** Quelle est la sollicitation majeure de cette pièce ? En déduire l'indice de performance pour une conception rigide avec objectif de masse minimale. Tracer la droite représentative de cet indice en prenant comme référence le matériau actuel de la bielle.

**Question 25.** Choisir le matériau le plus performant parmi ceux proposés (des fontes). Quel gain en masse peut-on espérer ?

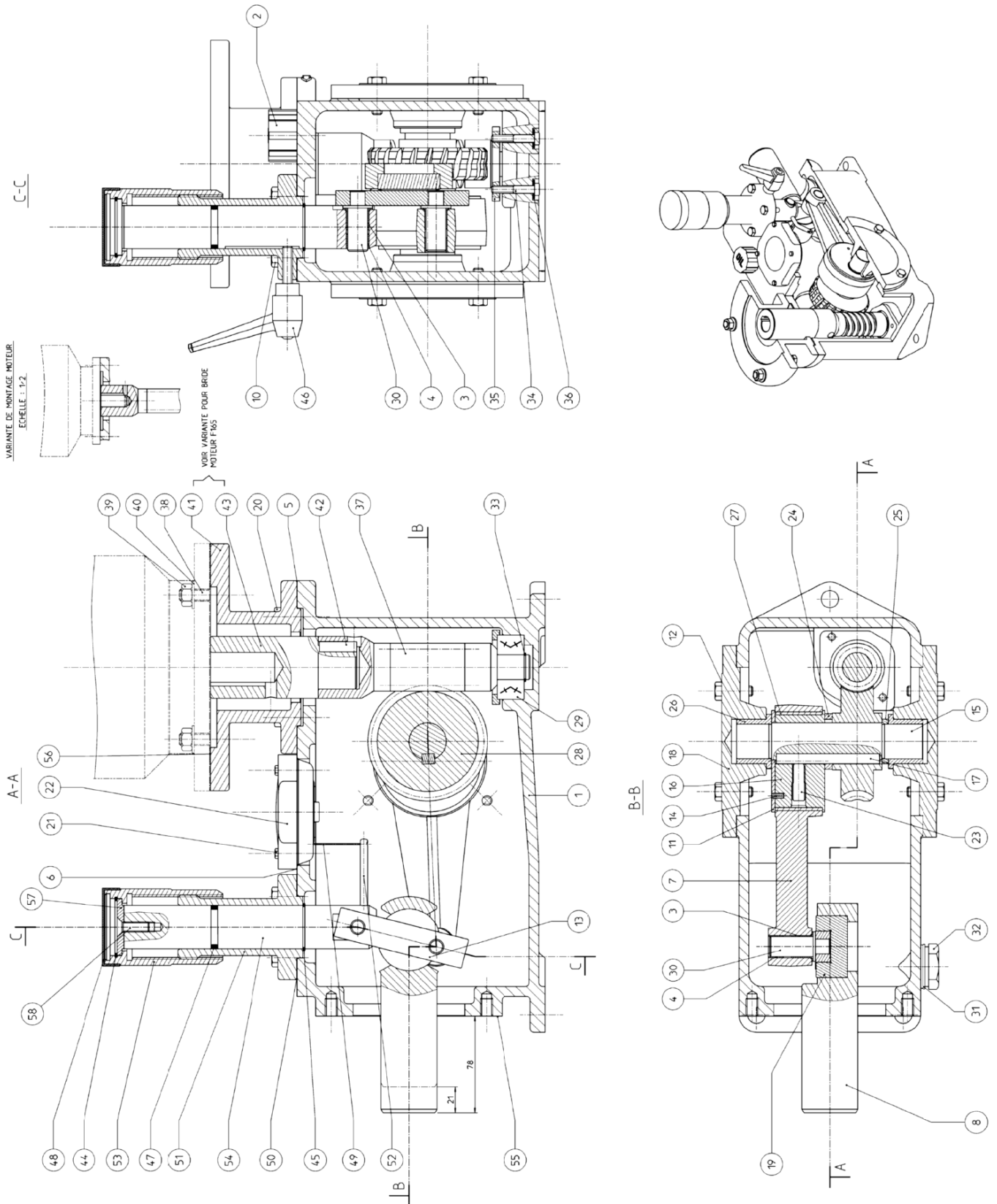
## **8. Amélioration de l'efficacité énergétique - conception**

L'implantation de la solution moteur synchrone + roulements nécessite de redessiner la ligne d'arbre 15 (**s'aider de l'annexe 5 pour suivre la description suivante**) :

- La pièce 18 côté bielle sera percée pour recevoir l'axe moteur.
- Le diamètre intérieur des flasques 18 sera adapté pour recevoir les roulements 6205 de la question 23.
- La roue 28 sera remplacée par une entretoise.
- La clavette 17 sera raccourcie pour n'entraîner que l'excentrique (finir son ébauche de dessin)
- Une pièce d'adaptation inspirée du design de la pièce 43 (**visible sur DR2**) sera placée entre l'arbre 15 et l'axe moteur. On s'inspire directement du montage actuel de la pièce 43.

**Question 26.** Sur le document réponse, proposer une reconception prenant en compte les recommandations proposées.

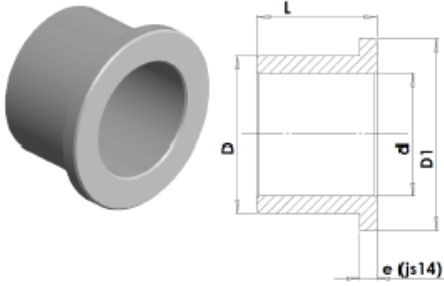
**9. Annexe 1 : plan d'ensemble**



**10. Annexe 2 : nomenclature**

58	1	Vis FHc-90 M8 x 25-22 Q.10.9	Acier
57	1	Rondelle de butée	Acier
56	1	Joint 20 x130 x1	
55	1	Joint 150 x90 x0,23	Papier
54	1	Colonne de réglage	C35
53	1	Ecrou de réglage	C35
52	1	Goupille coudée	C35
51	1	Support	EN-GJL 250
50	1	Joint 85 x 52 0,23	Papier
49	1	Câble de réglage	Inox
48	1	Bouchon	Plastique
47	1	Bague R N : 21 DI 27,8x3,6 L.J.F	Perbunan
46	1	Poignée MR 63P-M8x30 ELESA	Plastique
45	1	Circlips SEEGER H35	C75
44	1	Circlips int. C7000 DN46	C75
43	1	Manchon	C35
42	1	Clavette type C 10x8 L=30	C35
41	1	Bride d'adaptation	C35
40	4	Rondelle plate MU 10	Acier
39	4	Ecrou H M10	Acier Q 8.8
38	4	Goujon M 10-25/22 J=15	Acier Q 5.6
37	1	Vis sans fin	42CrMo4
36	2	Joint 6,2 x 15 x 1,5	Cuivre
35	1	Bride	C35
34	2	Vis Chc M6x35/18	Acier Q 8.8
33	1	Circlips ext.C7100 DN20	C75
32	1	Bouchon de vidange	C35
31	1	Joint	Acier
30	2	Axe de bielle	40 Cr Al Mo 6-12
29	1	Roulement réf :3304-SKF : 20x52x22	100Cr 6
28	1	Roue	Bronze
27	1	Bague pour bielle réf : MB7580DU	Acier + PTFE
26	2	Bague 28 x36 x28	Alpo calcar bronze
25	1	Entretoise	C35
24	1	Entretoise	C35
23	1	Vis Hc M 10x30	Q 12.9
22	1	Indicateur de débit	Ensemble
21	4	Vis H M 4x20/20	Inox
20	4	Vis H M8X20/18	Acier Q 8.8
19	1	Pave	40 Cr Al Mo 6-12
18	2	Flasque de côté	C35
17	1	Clavette forme A 8x10	C35
16	1	Excentrique	C35
15	1	Arbre transversal	C35
14	1	Goupille cannelée GO 5 D=4 L=10	Acier
13	1	Glissière	35 Cr Mo 4
12	8	Joint 8 x 10 x 2 CEFILAC	
11	1	Flasque d'excentrique	C35
10	12	Vis H M8x25/25	Acier Q 8.8
9	2	Joint 155 x 121 x 0,23	Papier
8	1	Porte piston	EN-GJS
7	1	Bielle droite	EN-GJL 250
6	1	Joint indicateur	Papier
5	1	Joint 140 x 95 x 0,23	Papier
4	2	Bague MB 16 12 DU	Acier + PTFE
3	2	Coussinet réf : FMB 1617 DU-SIC	Acier + PTFE
2	1	Bouchon ELESA SFP 3/4'	Plastique
1	1	Carter	A choisir Question16
REP	NB	DESIGNATION	MATIERE

**11. Annexe 3 : dessins de définitions**



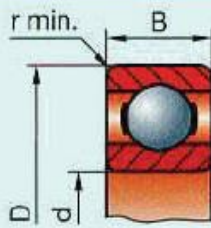
d	D	D1	e	L
20	26	32	3	16-20-25-32
22	28	34	3	15-20-25-30
25	32	39	3,5	20-27-32
28	36	44	4	22-28-36
30	38	46	4	20-25-30
32	40	48	4	20-25-30-32
36	45,8	54	4,5	22-28-36

On donne pour le coussinet (26):

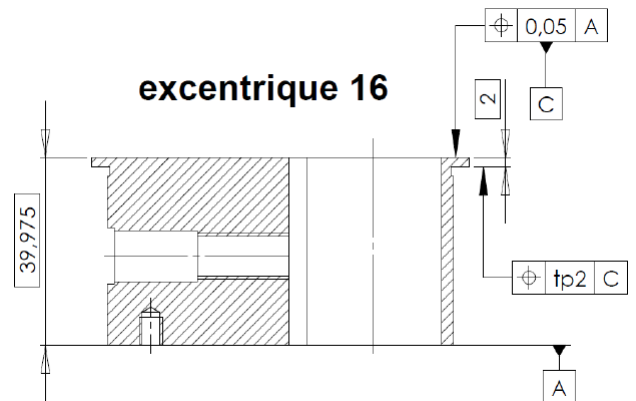
- $V_{max} = 8 \text{ m/s}$
- $T_{max} = 80 \text{ °C}$
- $p_{max} = 25 \text{ N/mm}^2$
- $(pV)_{max} = 1,8 \text{ W/mm}^2$

**Roulements ouverts**  
**Roulements à flasques**  
**Roulements à joints**

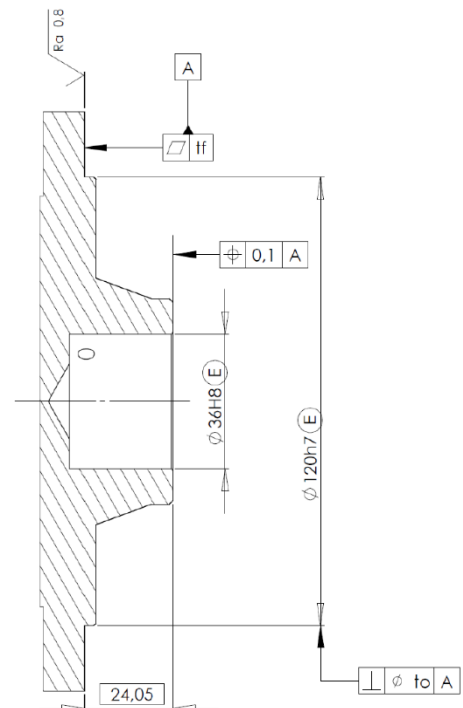
$C_0$  : charge statique de base  
 $C$  : charge dynamique de base



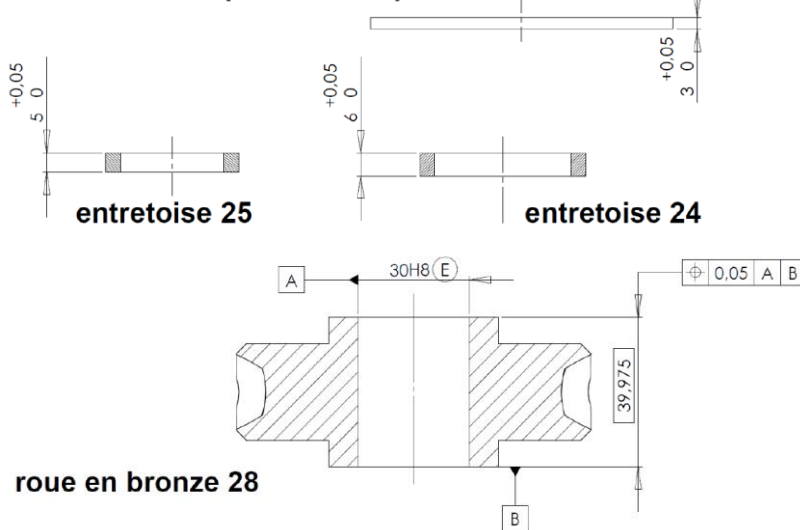
d	D	B	r	$C_0$ N	C N	n max.* tr/min
17	47	14	1	6 550	13 500	19 000
20	42	12	0,6	5 000	9 360	20 000
20	47	14	1	6 550	12 700	18 000
20	52	15	1,1	7 800	15 900	16 000
25	47	12	0,6	6 550	11 200	18 000
25	52	15	1	7 800	14 000	15 000
25	62	17	1,1	11 600	22 500	14 000
30	55	13	1	8 300	13 300	15 000
30	62	16	1	11 200	19 500	13 000
30	72	19	1,1	16 000	28 100	11 000



flasque de côté 18

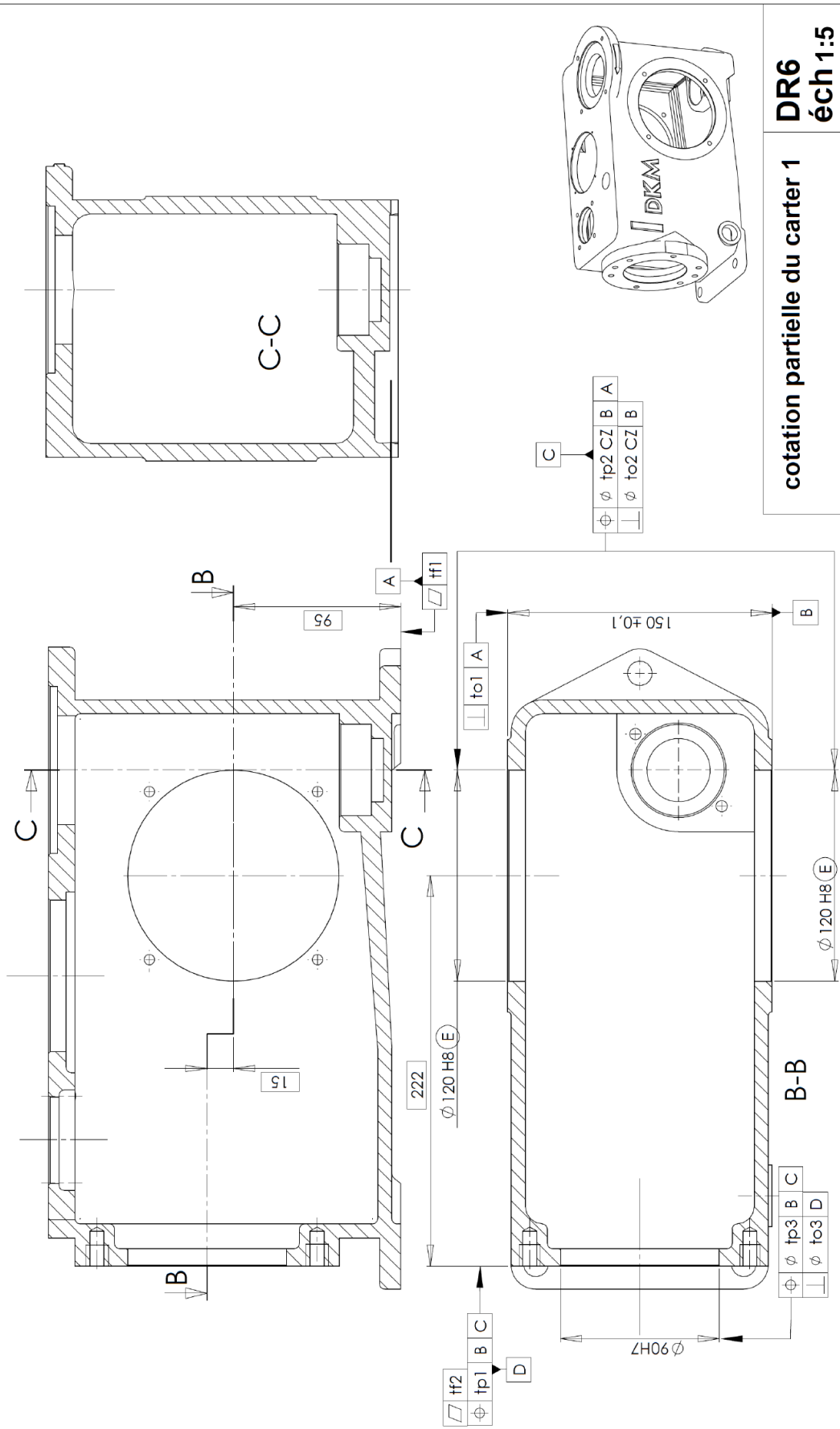


flasque excentrique 11





12. Annexe 4 : dessin de définition du carter



cotation partielle du carter 1  
**DR6**  
éch 1:5

13. Annexe 5 : dessin d'ensemble de la pompe

