

Documents interdits. Calculatrice autorisée.

Le candidat est invité à formuler toute hypothèse qui lui semblerait nécessaire pour pouvoir répondre aux questions posées.

Sauf indication, vous répondrez sur feuille de copie. Tous les résultats seront encadrés.

ETUDE D'UN MANIPULATEUR AUTO-EQUILIBRE PNEUMATIQUE.

Présentation générale.

Contexte et marché.

Les entreprises industrielles travaillent constamment à l'amélioration de la productivité et de la rentabilité. Sur des opérations de manutention, positionnement, montage, à faible cadence, l'automatisation à outrance et les cellules robotisées ne sont pas rentables... Les systèmes d'aide à la manutention sont un compromis intéressant. En effet l'employeur maintient une activité humaine (conservation d'emploi) tout en limitant la pénibilité donc en améliorant les conditions de travail, pour des coûts d'investissement modestes.

Il existe différentes familles de systèmes d'aide à la manutention :

- Potence,
- Pont roulant,
- Bras manipulateur...

C'est ce dernier type de système d'aide à la manutention que l'on se propose d'étudier. Plus particulièrement un matériel développé, fabriqué et distribué par la société SARRAZIN.

Principe.

La charge est suspendue en bout de bras à un système de préhension ou préhenseur. Le poids de la charge à manutentionner est équilibré par le bras, l'utilisateur accompagne la charge dans son déplacement... dans la limite des courses disponibles. Les seuls efforts à fournir sont ceux nécessaires à vaincre les frottements et les effets d'inertie. Lorsque l'utilisateur lâche la charge, elle doit rester stable en position dans l'espace.

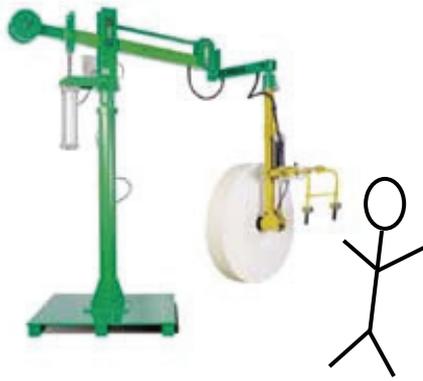


Figure 1 : Exemple de bras manipulateur de bobine.

Bras manipulateur étudié.

Le manipulateur étudié est constitué :

- D'un système de préhension, défini sur mesure en fonction de la charge à manutentionner.
- D'un bras articulé (cinématique brevetée).
- D'une tête en liaison pivot d'axe vertical par rapport à la colonne support,
- D'un actionneur pneumatique (ou éventuellement électrique) implanté dans la tête,
- D'une colonne support scellée au sol pour l'installation sur pied. Il existe aussi des versions suspendues à la charpente ou lestées autostables ne nécessitant pas d'ancrage au sol.

Les mobilités autorisées au niveau du bras et de la colonne permettent à l'utilisateur d'atteindre tout point de l'espace, dans la limite des courses disponibles. C'est l'action de l'utilisateur sur la charge (ou le préhenseur) qui provoque son mouvement. On parle de **système d'aide à la manutention**.

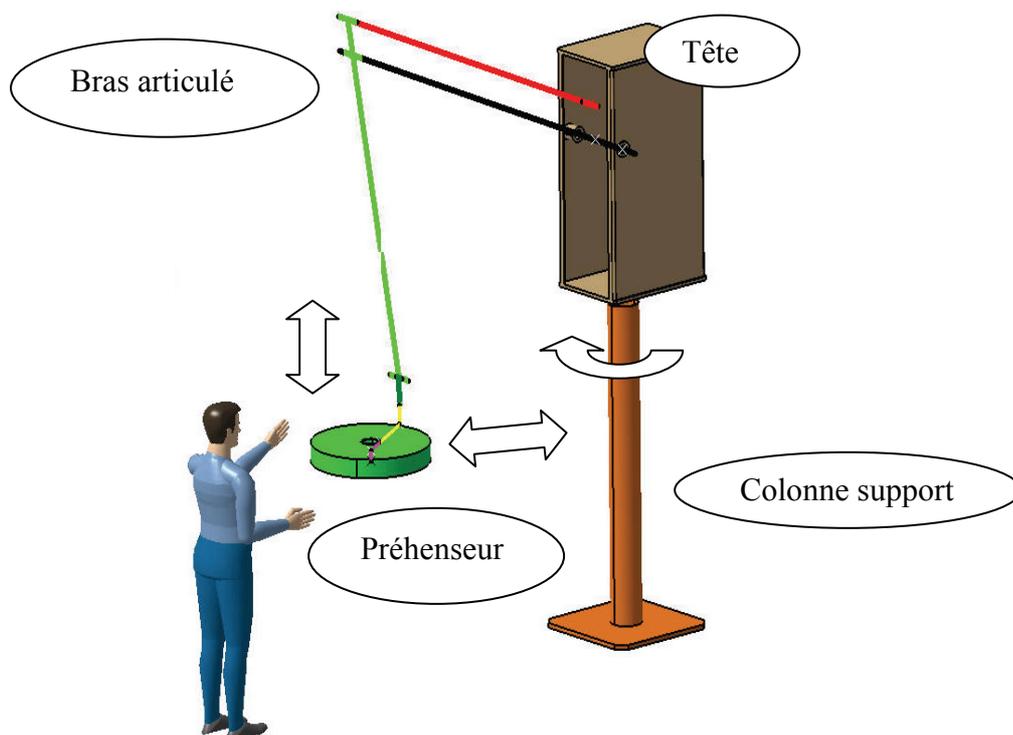


Figure 2 : Représentation simplifiée d'un bras manipulateur.

Utilisation.

Un cycle type d'utilisation du système d'aide à la manutention peut se décomposer de la manière suivante :

- Assister l'utilisateur pour le déplacement du préhenseur (suspendu en bout de bras) à vide jusqu'à proximité de la charge,
- Assister l'utilisateur pour le positionnement et l'orientation du préhenseur pour saisir la charge,
- Prendre la charge avec le préhenseur,
- Assister l'utilisateur pour le déplacement de la charge maintenue par le préhenseur,
- Assister l'utilisateur pour le positionnement et l'orientation de la charge pour la dépose,
- Dépose de la charge,
- Assister l'utilisateur pour le retour du préhenseur à vide pour le cycle suivant.

Certains mouvements de prise, de dépose ou d'orientation au niveau du préhenseur peuvent être motorisés, les autres étant provoqués par l'utilisateur.

Fonctionnement du bras manipulateur.

Etude de la cinématique du bras articulé.

La cinématique du bras manipulateur seul (sans l'articulation d'axe vertical) est donnée sur la figure 3. Elle est similaire à celle d'un pantographe. D'un côté la charge suspendue (au point H), de l'autre l'effort d'équilibrage développé par l'actionneur et appliqué au point D.

Le bras est constitué de 4 classes d'équivalence ou sous ensembles fonctionnels (sans compter la tête qui est représentée ici par le bâti). A savoir :

- Barre FC : Bras porteur,
- Barre CD : Bielle arrière,
- Barre ED' : Bras de reprise,
- Barre HE : Bras flèche.

Les liaisons en C, D', E et F sont des liaisons pivot d'axe perpendiculaire à la feuille. Ces 4 articulations forment un parallélogramme déformable.

Au point B, le bras est en liaison pivot avec la tête du manipulateur (représentée ici par le bâti).

Autres propriétés géométriques importantes :

- HFB est un triangle isocèle,
- Les points H, B et D restent constamment alignés quelque soit l'orientation du bras.

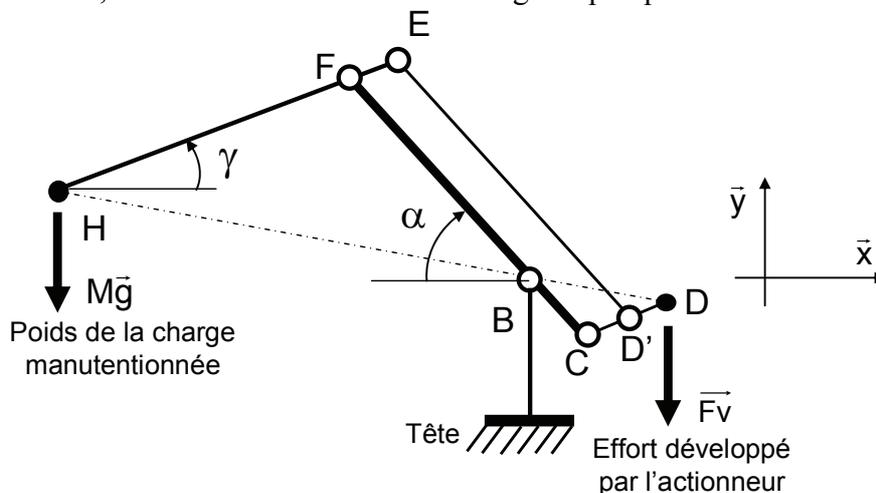


Figure 3 : Schéma cinématique du bras seul

Auto équilibrage pneumatique.

L'actionneur pneumatique est implanté dans la tête. L'extrémité de sa tige est en liaison mécanique avec le bras au point D.

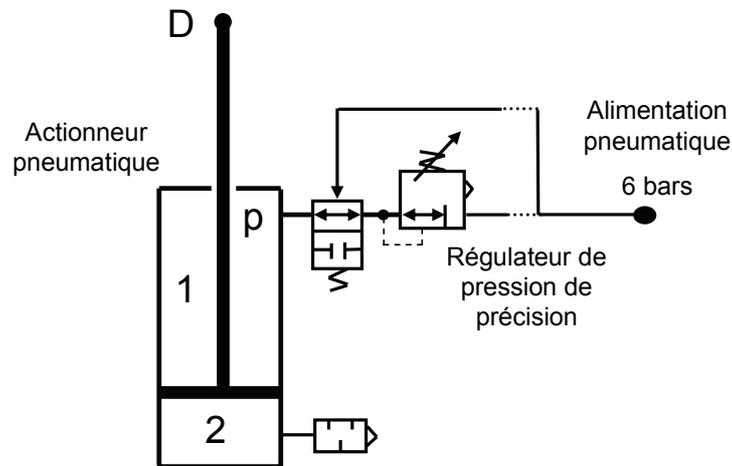


Figure 4 : Schéma pneumatique partiel d'alimentation de l'actionneur pneumatique.

L'action mécanique de la pression p établie dans le vérin équilibre la charge suspendue en bout de bras. Cette pression, dite d'équilibrage, est réglée par l'utilisateur et régulée par le régulateur de pression de précision.

Si l'opérateur exerce sur la charge un effort vers le bas pour la faire descendre, la tige du vérin est tirée vers le haut par l'intermédiaire du bras. L'air emprisonné dans la chambre 1 est en légère surpression donc le régulateur évacue le surplus d'air pour maintenir la pression d'équilibre. Lorsque l'opérateur lâche la charge, elle reste en équilibre.

Le principe est similaire pour faire monter la charge.

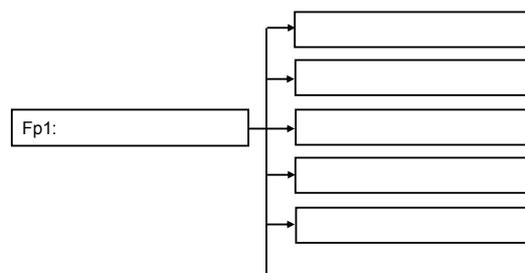
Ce système permet donc d'avoir une charge stable dans l'espace et déplaçable moyennant de faibles efforts, liés à l'inertie et aux frottements.

Le distributeur 2/2 est un organe de sécurité. En effet en cas de coupure d'alimentation pneumatique, la charge ne doit pas tomber sur l'utilisateur. Le distributeur 2/2 normalement fermé bloque l'air dans la chambre 1 du vérin et évite la chute brutale de la charge.

Partie 1 : Etude préliminaire.

Cette partie doit nous permettre de mieux comprendre le fonctionnement du bras manipulateur.

1. Identifier la fonction principale du bras manipulateur et de son préhenseur en phase d'utilisation normale. Développer cette fonction principale en sous fonctions dans un diagramme FAST comme ci-dessous :



- Tracer le graphe de liaisons du bras seul à partir du schéma cinématique proposé en figure 3.
- Calculer le nombre de mobilité et le degré d'hyperstatisme du bras seul.
- Proposer une évolution isostatique du schéma cinématique, tout en conservant la fonctionnalité. Commenter.
- Exprimer le rapport des longueurs HB/BD en fonction de HF et CD.

Ce rapport est indépendant de l'orientation du bras. Pour la suite il sera appelé rapport d'homothétie, il sera noté k ; en pratique $7 < k < 10$.

- En déduire la relation entre le poids de la charge (noté $M\vec{g}$) suspendue en bout de bras et l'effort développé par l'actionneur (noté \vec{F}_v) pour équilibrer cette charge. On négligera les poids des barres et on supposera les liaisons parfaites.

Les poids des barres constituant le bras ne sont pas négligeables. Pour compenser partiellement leurs incidences et assurer la stabilité de la charge dans l'espace quand l'opérateur la lâche, on dispose un contrepoids à l'arrière du bras porteur. **Nous n'étudierons pas ces problèmes d'équilibre.**

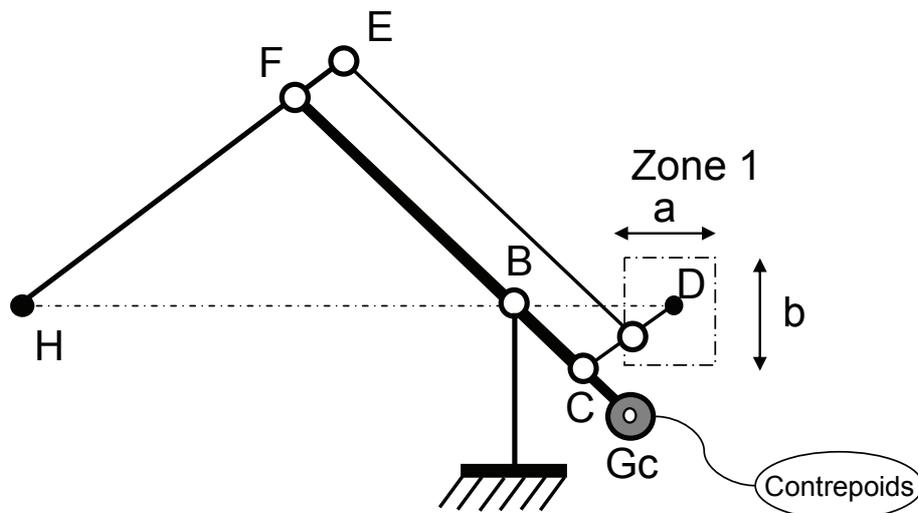


Figure 5 : Schéma cinématique avec contrepoids.

- Si le point D décrit une surface rectangulaire (zone 1 sur la figure 5), définir à l'échelle et caractériser sur le document réponse DR1 le lieu des points H. Les esquisses de construction seront soigneusement représentées.

Cette partie nous a permis de mieux comprendre le fonctionnement du bras manipulateur. Pour une charge constante en bout de bras, un effort constant vertical au point D permet d'équilibrer la charge dans toutes les positions permises par la cinématique du bras...

Pour toute la suite de l'étude, on prendra ::

- Masse nominale suspendue en bout du bras : $M= 60 \text{ kg}$,
- Course verticale du point H : $h= 1500 \text{ mm}$,
- Rapport d'homothétie : $k= HB/BD= 9$
- $FB= 2000 \text{ mm}$
- $\vec{HB} \cdot \vec{x}_{\text{maxi}}= 3500 \text{ mm}$

Partie 2 : Choix et implantation de l'actionneur pneumatique.

L'objectif de cette partie est de choisir un actionneur pneumatique exerçant l'effort d'équilibrage au point D et de définir son implantation.

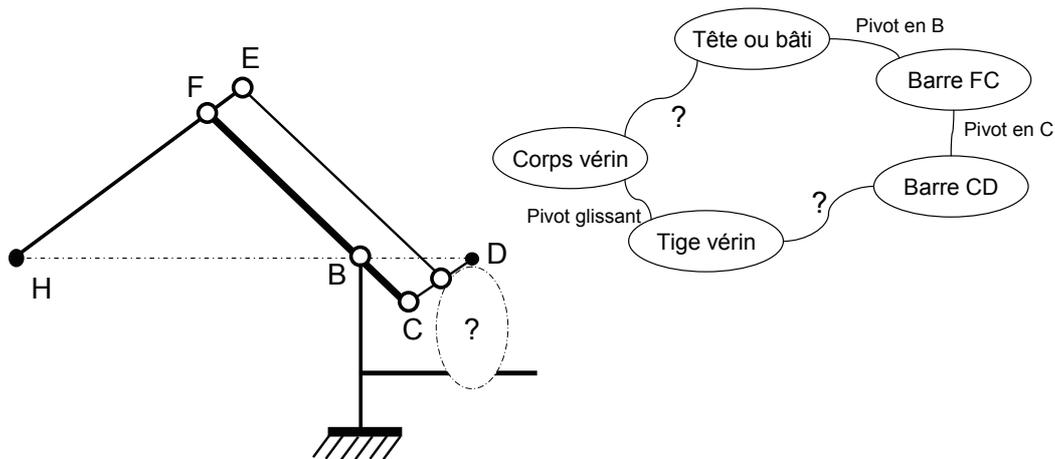


Figure 6 : Schéma cinématique et graphe de liaisons incomplètes.

On souhaite proposer une architecture pour l'implantation du vérin pneumatique.

8. Compléter les tableaux des documents réponse DR2 et DR3.
9. La pression du réseau pneumatique étant de 6 bars, choisir un actionneur pneumatique dans la documentation jointe en annexe 1. Vous préciserez le diamètre du piston, le diamètre de tige, la course et la référence constructeur du vérin.

Le schéma technologique partiel de la liaison entre le bras au point D et la tige du vérin est représenté sur le document réponse DR4.

10. Compléter le schéma technologique du document réponse DR4 en définissant :
 - Les arrêts des roulements à billes à contact radial (les bagues intérieures et extérieures seront arrêtées).
 - La liaison entre la tige du vérin et l'axe de l'articulation en D.

Partie 3 : Définition de la liaison pivot de la tête avec le bâti.

L'objectif de cette partie est de choisir un composant et de définir son implantation pour réaliser la liaison pivot entre la tête et la colonne support.

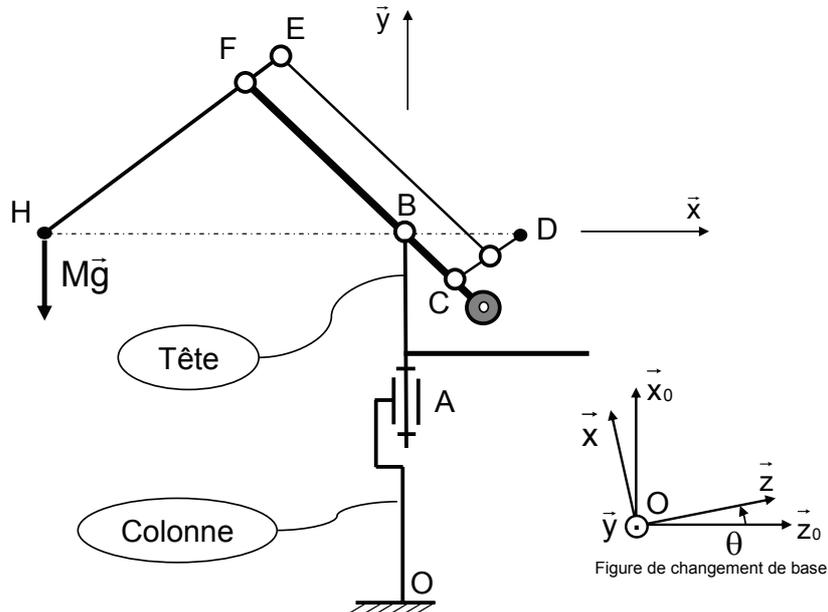


Figure 7 : Schéma cinématique bras manipulateur, sans actionneur.

La tête du bras manipulateur est articulée autour d'un axe vertical par rapport à la colonne fixée au sol. Cette liaison pivot au point A permet à l'utilisateur, lors du déplacement de sa charge, de desservir un volume limité par deux surfaces cylindriques coaxiales.

Pour réaliser cette liaison pivot en limitant l'encombrement et la complexité des pièces adjacentes, le constructeur s'est orienté vers une couronne d'orientation (voir descriptif en annexe 2). Les questions qui suivent permettront de choisir cette couronne d'orientation et de définir son implantation.

Données :

- $(\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ base liée à la colonne donc ici le bâti,
- $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ base liée à la tête du bras.

Hypothèse :

On négligera les poids du bras et de la tête. Donc, seul le poids de la charge sera pris en compte.

11. Exprimer le torseur des actions mécaniques de la tête sur le bras, développées dans la liaison pivot au point B, dans la base $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ exprimé en B. Calculer les composantes.
12. Exprimer le torseur des actions mécaniques de la colonne support sur la tête, développées dans la liaison pivot au point A, dans la base $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ exprimé en A. Calculer les composantes.

Fort de ces résultats, le constructeur a choisi un modèle de couronne d'orientation de la famille 03 de chez Rollix Defontaine. (Voir extrait de documentation en annexe 2).

13. Sur le document réponse DR5, définir l'implantation détaillée de cette couronne entre la tête et la colonne.
- La bague extérieure de la couronne sera en liaison complète démontable (par éléments filetés) avec la tête.
 - La bague intérieure de la couronne sera en liaison complète démontable (par éléments filetés) avec la colonne.

Partie 4 : Etude dynamique simplifiée.

On propose le schéma cinématique minimal ci-dessous.

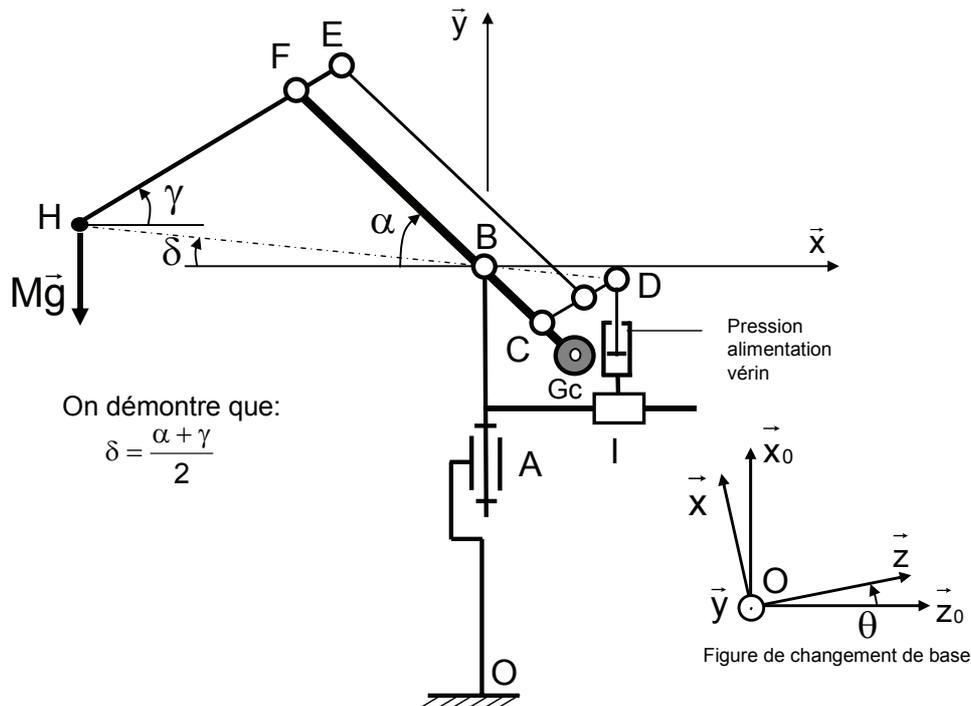


Figure 8 : Schéma cinématique bras manipulateur complet.

L'objectif de cette partie est d'estimer les efforts que devra exercer l'utilisateur lors d'une opération de manutention... afin de s'assurer que ces efforts sont compatibles avec le cahier des charges client et les recommandations faites par les normes en vigueur.

Données :

- $(\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ base liée à la colonne donc ici le bâti,
- $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ base liée à la tête du bras,
- Diamètre du piston de vérin : D_v ,
- G et M : centre d'inertie et masse de la charge suspendue en bout de bras,
- C_{fa} : couple de frottement sec au niveau de l'articulation d'axe vertical en A,
- F_f : Frottement sec s'opposant au mouvement horizontal de l'actionneur pneumatique,
- F_{vf} : Frottement sec s'opposant au mouvement de translation du piston dans le vérin,
- Δ_p : Sensibilité de déclenchement du régulateur de pression de précision. Lors d'un mouvement de montée (ou descente), il faudra une variation de pression Δ_p dans la chambre 1 du vérin pour que le régulateur de précision admette (ou évacue) de l'air pour maintenir la pression d'équilibrage.

Hypothèses :

- On supposera G, le centre d'inertie de la masse M en H.
- La section de la tige de vérin sera négligée devant la section du piston.
- On négligera les masses des barres constituant le bras, du contrepoids et de la tête. Donc, sauf indication contraire, seule la masse de la charge sera prise en compte. Cette dernière sera considérée comme une masse ponctuelle.

En phase de rotation de la charge autour de l'axe vertical (O, \vec{y}_0) .

14. Exprimer le moment dynamique au point B, en projection sur \vec{y}_0 , de la charge de masse M dans son mouvement par rapport à R0, en fonction de M, BH, δ , θ et ses dérivées successives par rapport au temps.

La forme générale du torseur des actions mécaniques de l'utilisateur sur la charge exprimée en H, dans la base $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ est notée :

$$\left\{ \mathbf{T}_{\text{utili} \rightarrow \text{charge}} \right\}_H = \left\{ \begin{array}{l} F_x \\ F_y \\ F_z \end{array} \quad \begin{array}{l} 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right\}_{(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})}$$

15. Exprimer la composante Fz du torseur des actions mécaniques de l'utilisateur sur la charge en phase de rotation accélérée autour de l'axe (O, \vec{y}_0)

La vitesse du point G appartenant à la charge, exprimée dans la base $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ est notée :

$$\left\{ \vec{V}_{G \in \text{Charge}/R0} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} V_x \\ V_y \\ V_z \end{array} \right\}_{(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})}$$

L'accélération du point G appartenant à la charge, exprimée dans la base $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ est notée :

$$\left\{ \vec{\Gamma}_{(G/R0)} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} a_x \\ a_y \\ a_z \end{array} \right\}_{(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})}$$

En phase de déplacement radial suivant \vec{x} .

16. Exprimer l'énergie cinétique de la masse M, dans son mouvement par rapport au bâti, déplacée par l'opérateur suivant \vec{x} (rotation autour de (O, \vec{y}_0) bloquée).
17. Rappeler le théorème de l'énergie cinétique sous sa forme générale en définissant vos notations.
18. En phase de mouvement accéléré, exprimer la composante F_x du torseur des actions mécaniques de l'utilisateur sur la charge, en fonction de M, a_x , F_f et k.

En phase de déplacement vertical suivant \vec{y} .

19. Exprimer l'énergie cinétique de la masse M, dans son mouvement par rapport au bâti, déplacée par l'opérateur suivant \vec{y} (rotation autour de (O, \vec{y}_0) bloquée)
20. En phase de mouvement accéléré, exprimer la composante F_y du torseur des actions mécaniques de l'utilisateur sur la charge, en fonction de M, a_y , F_{vf} , k, Δ_p , et D_v .

Données :

- M= 60 kg
 $a_x = a_y = a_z = 0,5 \text{ m/s}^2$
 $\overrightarrow{HB} \cdot \vec{x} = 3500 \text{ mm}$
 $D_v = 125 \text{ mm}$
 $C_{fa} = 5 \text{ Nm}$
 $F_f = 20 \text{ N}$
 $F_{vf} = 100 \text{ N}$
 $\Delta_p = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ bar}$

21. Calculer les efforts F_z , F_y et F_x respectivement à développer pour chacun des 3 mouvements décrits ci-avant et faire un tableau récapitulatif (comme ci-dessous) pour une phase d'accélération uniforme et une phase de déplacement à vitesse constante. Conclure.

	$a_x = 0,5 \text{ m/s}^2$	$a_x = 0$
F_x		
	$a_y = 0,5 \text{ m/s}^2$	$a_y = 0$
F_y		
	$a_z = 0,5 \text{ m/s}^2$	$a_z = 0$
F_z		

22. Même si la plupart des liaisons pivot sont montées sur roulements à billes, le rendement mécanique global du bras est estimé à $\eta = 0,8$. Reprendre les questions 18 et 20 en prenant en compte le rendement.

En fait les inerties des bras et de la tête ne sont pas négligeables...

23. Qualitativement, quelle est l'incidence des masses des éléments constituant le bras sur l'effort à développer par l'utilisateur.

Partie 5 : Etude du bras manipulateur complet.

L'objectif de cette partie est de calculer les actions mécaniques dans les articulations N et H. Ceci permettrait de dimensionner les guidages.

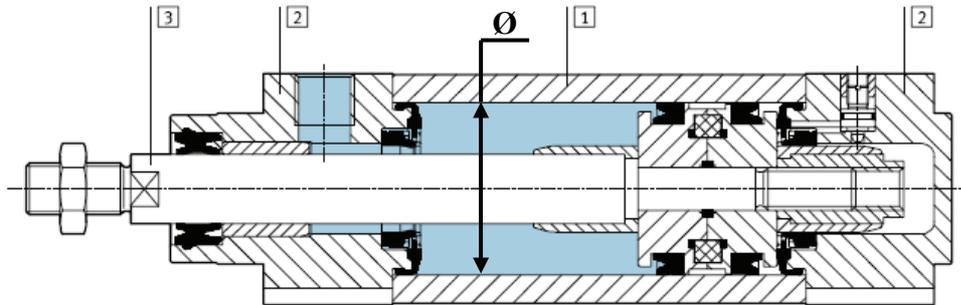
Lorsque le poids de la charge manutentionnée n'est pas à la verticale du point H, pour maintenir une orientation fixe de la charge par rapport à la verticale, on utilisera un système complémentaire dit de maintien horizontal. Ce système est constitué de deux biellettes (KJ et LN) formant deux parallélogrammes déformables avec le bras porteur (FC) et le bras flèche (HE). Voir Schéma cinématique figure 9.

Annexe 1 : Vérins normalisés DNC, ISO 6431 et VDMA 24 562

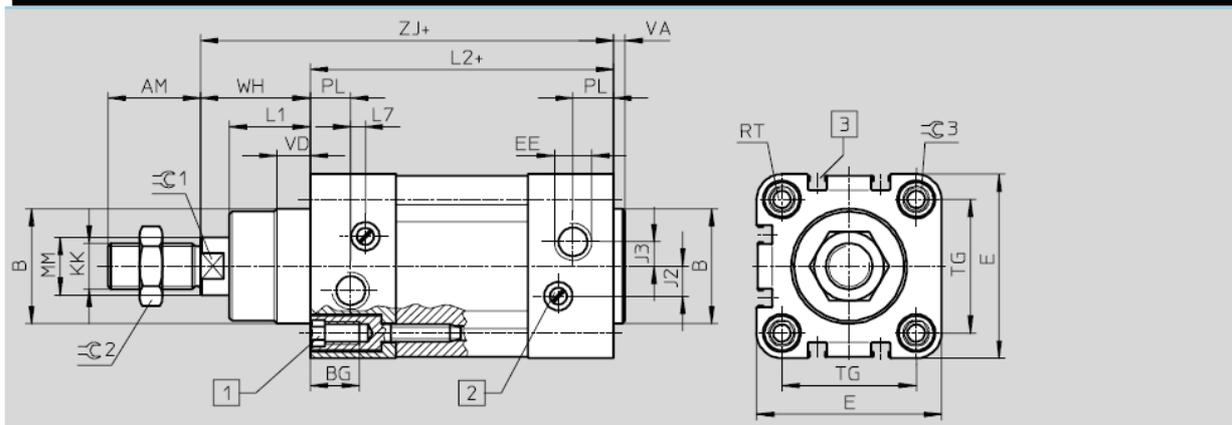
Fiche de données techniques

Matériaux

Coupe fonctionnelle



Variante	Type de base	CT	K10	R3
1 Tube de vérin	Alliage d'aluminium anodisé	Alliage d'aluminium anodisé	Alliage d'aluminium anodisé	Alliage d'aluminium anodisé
2 Couvercle, palier et obturation	Alu moulé sous pression			
3 Tige de piston	Acier fortement allié	Acier fortement allié	Alliage d'aluminium anodisé	Acier inoxydable fortement allié
- Joints	Polyuréthane, caoutchouc nitrile	Polyuréthane, caoutchouc nitrile	Polyuréthane, caoutchouc nitrile	Polyuréthane, caoutchouc nitrile



Ø [mm]	L7	MM Ø f8	PL	RT	TG	VA	VD	WH	ZJ	≈C1	≈C2	≈C3
32	3,3	12	15,6	M6	32,5	4	10	26	120	10	16	6
40	3,6	16	14	M6	38	4	10,5	30	135	13	18	6
50	5,1	20	14	M8	46,5	4	11,5	37	143	17	24	8
63	6,6	20	17	M8	56,5	4	15	37	158	17	24	8
80	10,5	25	16,4	M10	72	4	15,7	46	174	22	30	6
100	8	25	18,8	M10	89	4	19,2	51	189	22	30	6
125	14	32	18	M12	110	6	20,5	65	225	27	36	8

Références – Type de base				
Type	Piston Ø [mm]	Course [mm]	Sans détection de position	
			N° pièce	Type ¹⁾
	80	25	163 447	DNC-80-25-PPV
		40	163 448	DNC-80-40-PPV
		50	163 449	DNC-80-50-PPV
		80	163 450	DNC-80-80-PPV
		100	163 451	DNC-80-100-PPV
		125	163 452	DNC-80-125-PPV
		160	163 453	DNC-80-160-PPV
		200	163 454	DNC-80-200-PPV
		250	163 455	DNC-80-250-PPV
		320	163 456	DNC-80-320-PPV
		400	163 457	DNC-80-400-PPV
	500	163 458	DNC-80-500-PPV	
	100	25	163 479	DNC-100-25-PPV
		40	163 480	DNC-100-40-PPV
		50	163 481	DNC-100-50-PPV
		80	163 482	DNC-100-80-PPV
		100	163 483	DNC-100-100-PPV
		125	163 484	DNC-100-125-PPV
		160	163 485	DNC-100-160-PPV
		200	163 486	DNC-100-200-PPV
		250	163 487	DNC-100-250-PPV
		320	163 488	DNC-100-320-PPV
		400	163 489	DNC-100-400-PPV
	500	163 490	DNC-100-500-PPV	
	125	25	163 511	DNC-125-25-PPV
		40	163 512	DNC-125-40-PPV
		50	163 513	DNC-125-50-PPV
		80	163 514	DNC-125-80-PPV
		100	163 515	DNC-125-100-PPV
		125	163 516	DNC-125-125-PPV
		160	163 517	DNC-125-160-PPV
		200	163 518	DNC-125-200-PPV
		250	163 519	DNC-125-250-PPV
320		163 520	DNC-125-320-PPV	
400		163 521	DNC-125-400-PPV	
500	163 522	DNC-125-500-PPV		

Annexe 2 : Couronnes d'orientation.

Les couronnes d'orientation intègrent les fonctions :

- Guider en rotation,
- Transmettre le mouvement de rotation, (pas systématiquement)
- Permettre la fixation directe sur les éléments adjacents.

L'intégration de ces fonctions techniques en un seul composant permet de simplifier considérablement la conception (par rapport à une solution pivot sur palier à roulements) et d'avoir un montage très compact (en épaisseur) tout en supportant des charges radiales, axiales ainsi qu'un moment de renversement important.

Les applications sont nombreuses :

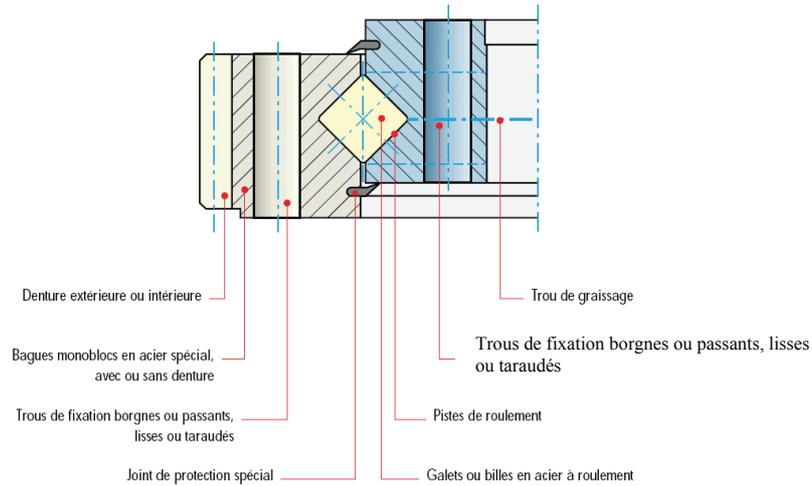
- Robotique,
- Eolienne,
- Radar,
- Ferroviaire,
- Machines spéciales,
- Travaux publics,
- Manutention, nacelles...

Comme un roulement à billes, une couronne d'orientation est constituée d'une bague intérieure et d'une bague extérieure dans lesquelles des perçages permettent la fixation par éléments filetés sur les pièces adjacentes.

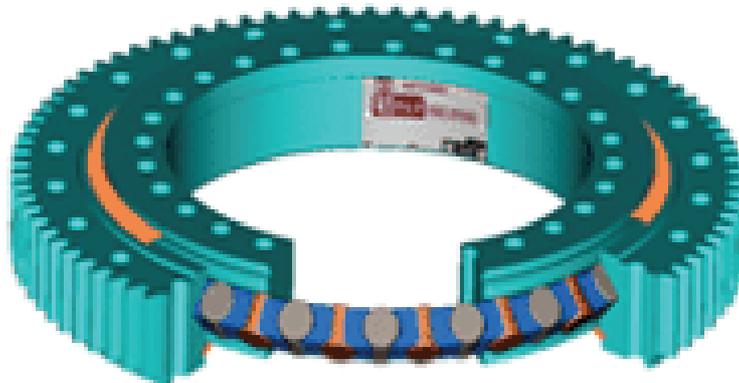
Entre ces deux bagues sont interposés des éléments roulants, soit des billes, soit des galets alternativement croisés, pour les fortes charges.

Ces bagues intérieures ou extérieures peuvent être dotées d'une denture permettant la motorisation du mouvement de rotation.

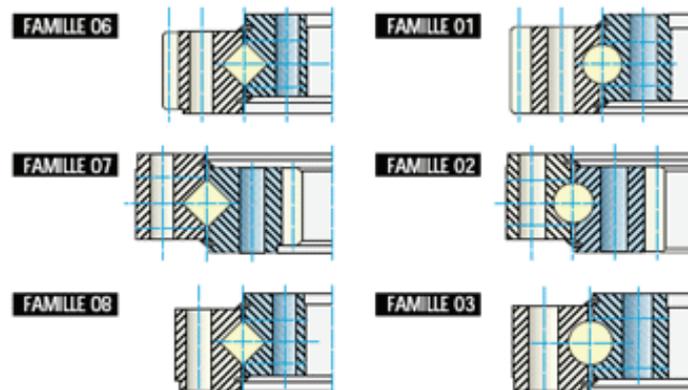
Vue en coupe d'une couronne d'orientation à galets croisés à denture extérieure. (Source catalogue ROLLIX)

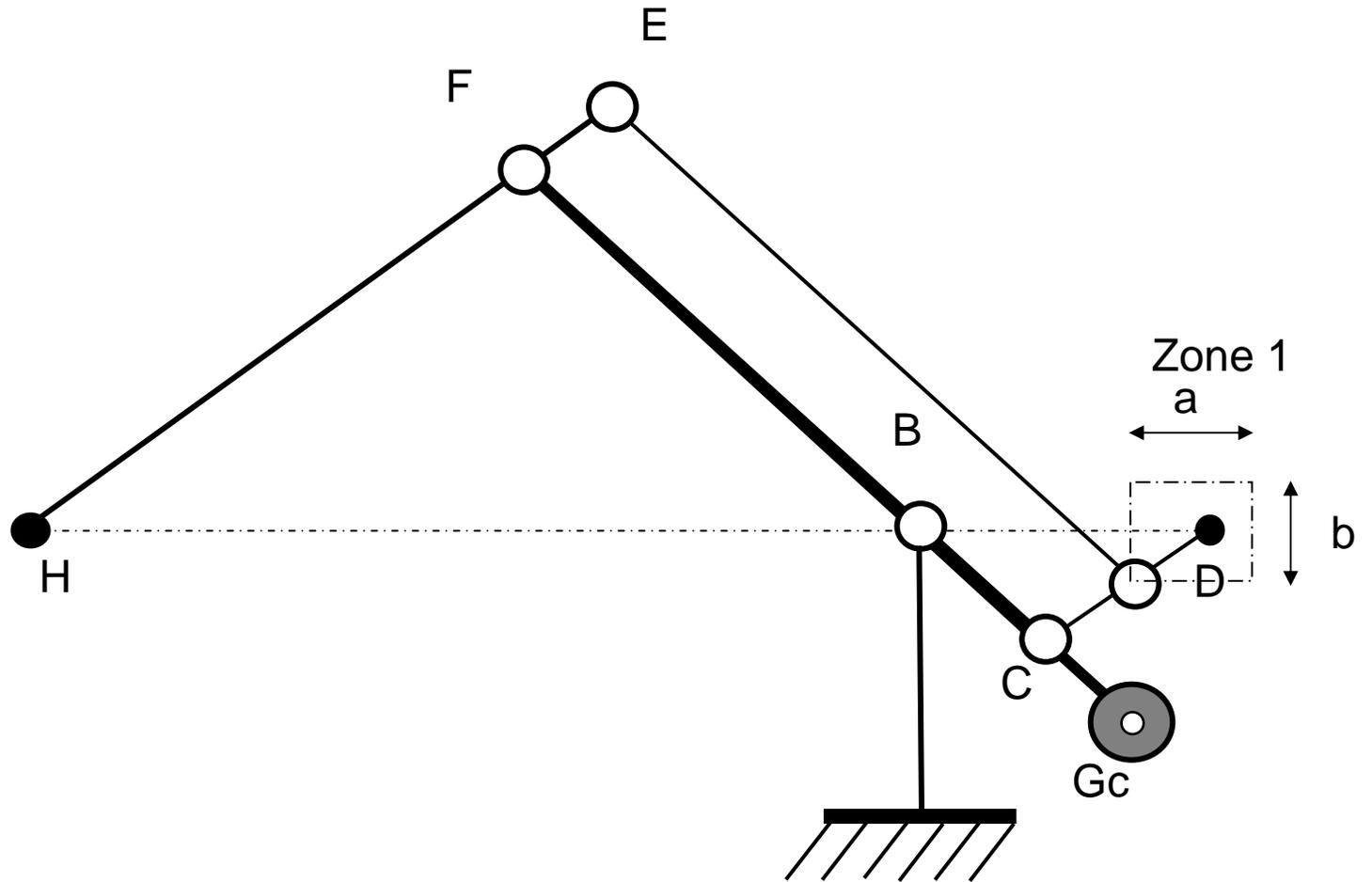


Vue 3D en coupe partielle d'une couronne d'orientation à galets croisés à denture extérieure. (Source site internet ROLLIX)



Quelques familles de couronnes d'orientation (Source catalogue ROLLIX)





Document réponse DR3

Implantation de l'actionneur pneumatique

Solution 1	Solution 2	Solution 3	Solution 4
------------	------------	------------	------------

Identifier les avantages (aptitudes au fonctionnement, simplicité...) de chaque solution.

--	--	--	--

Identifier les inconvénients (inaptitudes au fonctionnement, complexité...) de chaque solution.

--	--	--	--

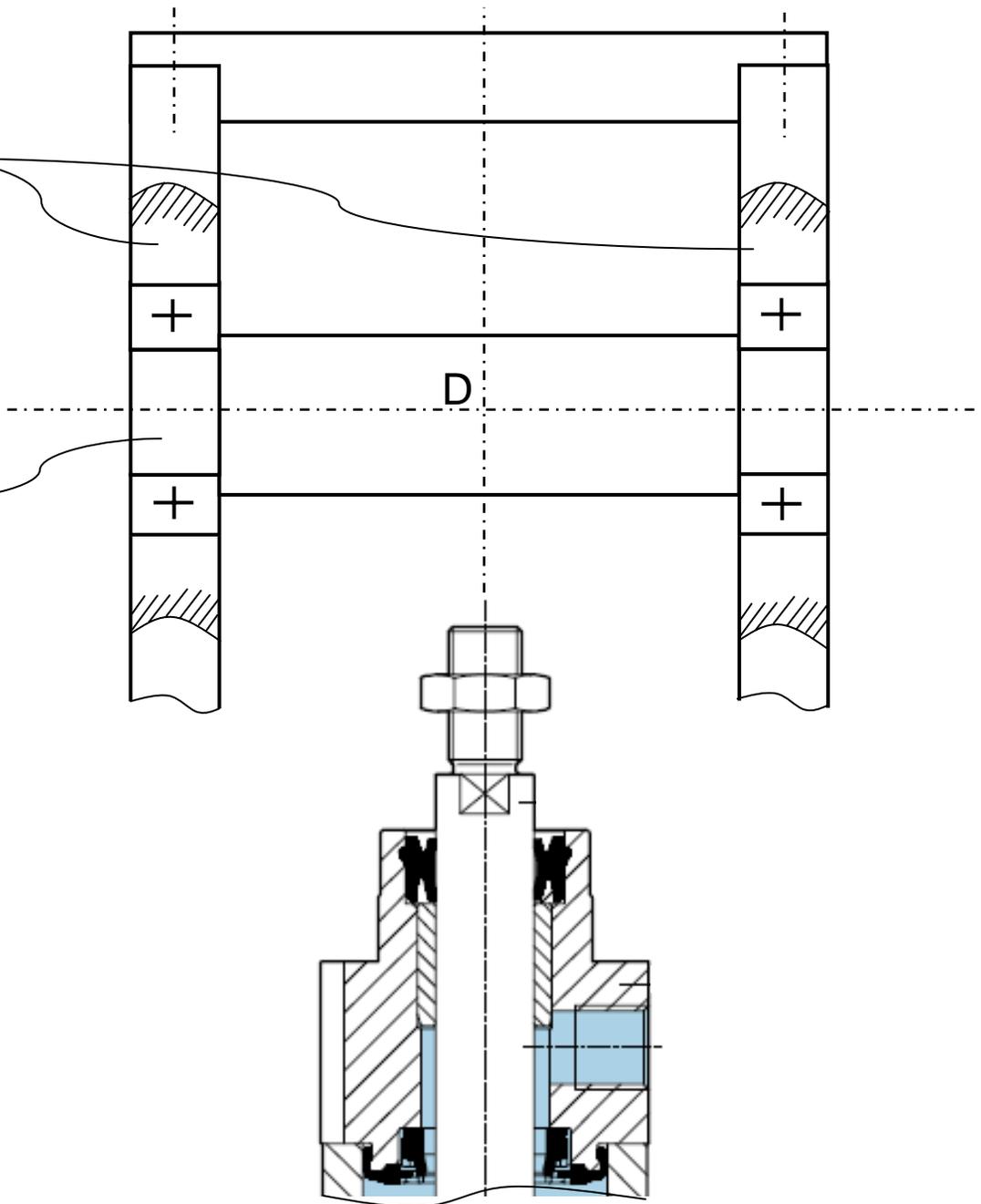
Spécifier si la solution est : refusée, acceptable ou recommandée. Argumenter

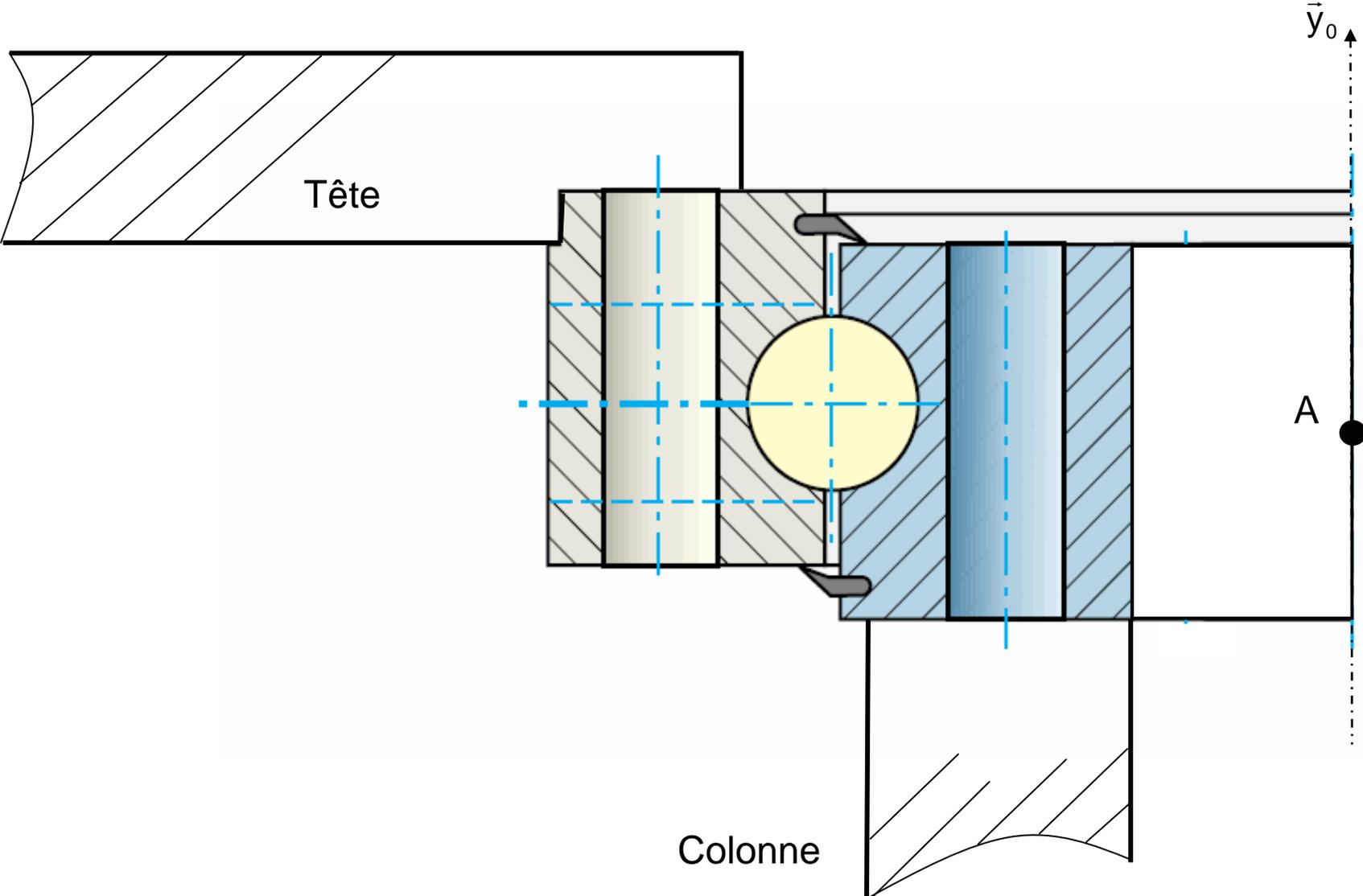
--	--	--	--

Document réponse DR4

Barres CD

Axe articulation





Annexe 3

Plan ensemble Bras flèche

