

SESSION 2010

---

**AGREGATION  
CONCOURS EXTERNE**

**Sections : GÉNIE MÉCANIQUE / MÉCANIQUE**

**ÉPREUVE D'ANALYSE ET DE CONCEPTION DES SYSTÈMES**

Durée : 8 heures

---

*Calculatrice électronique de poche – y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.*

*L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.*

*Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.*

*De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.*

**NB : Hormis l'en-tête détachable, la copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.**

**Tournez la page S.V.P.**

A

### **Le sujet comporte 60 pages**

- une présentation de l'étude (pages 3/60 à 6/60) ;
- le texte de l'étude (pages 7/60 à 33/60) ;
- le dossier technique constitué des documents repérés Documents Techniques DT1 à DT17 ;
- le dossier réponses contenant des documents repérés Documents Réponses DR1 à DR7.

### **RECOMMANDATIONS**

L'étude est composée de 5 parties indépendantes.

Il est proposé au candidat de répartir son temps de travail sur les différentes parties de l'étude de la façon suivante :

<b>Lecture du sujet</b>		<b>1 heure</b>
<b>Partie 1</b>	<b>Analyse globale du bras élévateur aérien</b>	<b>1 heure</b>
<b>Partie 2</b>	<b>Analyse et conception de l'orientation de la tourelle</b>	<b>2 heures</b>
<b>Partie 3</b>	<b>Analyse et conception du bras télescopique</b>	<b>1,5 heure</b>
<b>Partie 4</b>	<b>Analyse et conception du bras pendulaire</b>	<b>1,5 heure</b>
<b>Partie 5</b>	<b>Sécurité du porteur – synthèse globale du sujet</b>	<b>1 heure</b>

Le candidat devra rendre :

- 5 copies séparées correspondant aux 5 parties du sujet ;
- les documents réponses, qui seront insérés dans la copie afférente à la partie traitée.

## PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE : BRAS ÉLÉVATEUR AÉRIEN

Le Bras Élévateur Aérien (BEA) automobile est un engin élévateur de personnes destiné à la lutte contre l'incendie. Sa fonction principale est d'élever en toute sécurité 5 personnes ou une masse totale de 500 kg à une hauteur maximale de 33 m environ du sol pour intervenir sur des feux. Le modèle étudié est le 330 TBI conçu et réalisé par la société EGI située à Charleville-Mézières filiale du groupe GIMAEX spécialisé dans la lutte contre le feu, la protection de l'environnement, le secours routier ou encore le sauvetage et l'extinction en hauteur.

Les points forts du BEA 330 TBI signalés par la société sont :

- recherche de la compacité et de la mobilité pour les accès encombrés. Avantage : réalisation du bras élévateur le plus compact du marché. En effet le 330 TBI ne fait que 8,30 m de long sur un châssis carrossé de PTAC 18/19 tonnes avec un rayon de braquage réduit ;
- rapidité d'intervention : mise en station automatique : le châssis se positionne à l'horizontale automatiquement en quelques secondes dans des pentes et devers atteignant 7° ;
- performances certifiées (APAVE-CNMIS) : hauteur de sauvetage de 32,6 m (selon NF EN 1777), portée de 20,30 m, et charge nacelle de 500 kg (5 personnes). Il peut embarquer en nacelle une lance canon/mixte de 3500 L/min de débit ;
- intelligence électronique.



Figure 1 : vue du BEA sur stabilisateurs

### Adaptation aux terrains et aux architectures difficiles

L'adaptabilité des BEA aux terrains difficiles et aux architectures complexes des espaces urbains modernes est le résultat de différents choix technologiques concernant :

#### **Stabilisation à caissons doubles**

La conception en caissons superposés du faux châssis et en doubles caissons assure les meilleurs coefficients de stabilité dans toutes les situations.

#### **Stabilisation « intelligente »**

La position de chaque stabilisateur peut être adaptée en fonction de l'environnement du site d'intervention.

L'adaptation aux dévers et pentes jusqu'à 7° est assurée par une mise à niveau automatique grâce au grand débattement individuel des caissons verticaux.

### **Bras à double télescope**

À partir de la classe 30, la structure extensible combine un bras principal télescopique à 4 ou 5 éléments avec un bras articulé (bras pendulaire) à 2 éléments monté latéralement.

Ceci confère à l'ensemble routier des dimensions hors tout en hauteur et en longueur les plus réduites du marché, ainsi qu'un rayon de braquage inchangé grâce à l'absence de porte-à-faux avant.

Le concept de bras articulé télescopique offre par ailleurs une capacité de surplomb des obstacles de plus de 10 m.

### **Plateforme de sauvetage APOLLO**

La géométrie du bras permet d'utiliser la technique dite de « nacelle » suspendue, qui compte tenu des capacités de sauvetage des BEA, présente des niveaux de sécurité inégalés par la technique de plateforme portée, trop dangereuse pour les niveaux de charge permis par les BEA.

Elle offre une très grande surface au sol pour une capacité de secours de 5 personnes. L'accès est facilité grâce à une grande ouverture frontale équipée d'un abattant extérieur et d'une ouverture arrière, toutes sécurisées par un verrouillage asservi par ordinateur.

Les manœuvres délicates à proximité d'obstacle sont également sécurisées grâce à une combinaison de détecteurs de proximité.

### **Postes de commande**

Les postes de commande sont directement dérivés des postes échelles automatiques. Ils présentent les mêmes caractéristiques d'ergonomie et les mêmes fonctionnalités.

Les BEA bénéficient de l'assistance au pilotage par une centrale de contrôle et sécurité. L'opérateur peut ainsi conduire ses opérations avec la plus grande acuité et réagir immédiatement à tout événement en cours d'intervention.



Figure 2 : attaque d'un feu par un BEA

L'engin peut être décomposé en sept sous-ensembles :

- 1.** le véhicule porteur, élément de la gamme d'un constructeur de véhicules poids lourds ;
- 2.** un faux châssis composé d'un caisson fermé de section rectangulaire qui forme une ossature rigide épargnant au châssis du véhicule toutes sollicitations (flexions, vrillage, torsions). L'assemblage de ces éléments est réalisé par soudure. L'ensemble est fixé au châssis par des corbeaux et des platines fixés suivant les recommandations de montage du constructeur du véhicule.

Ce faux châssis permet la fixation :

- de l'ensemble de stabilisation ;
- de la couronne d'orientation destinée à supporter la tourelle et à assurer la rotation de l'ensemble bras élévateur en continu ;
- du réservoir hydraulique et de la pompe ;

- des coffres de rangement latéraux ;
- du repose-bras.

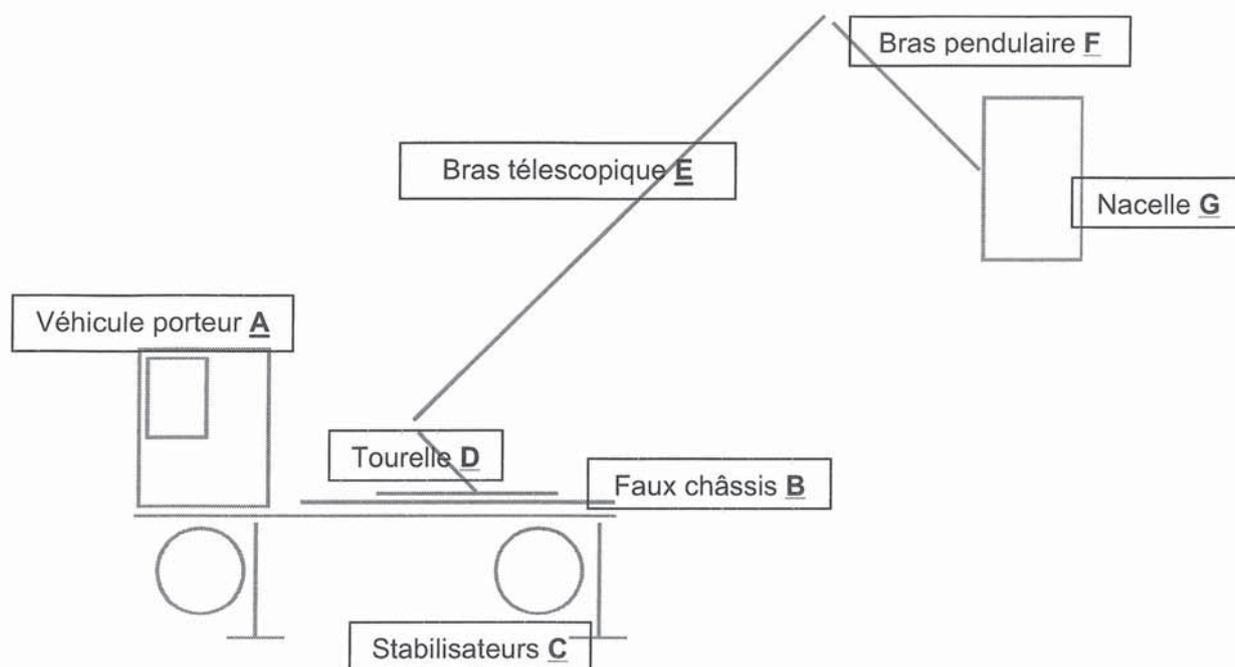


Figure 3 : décomposition modulaire du BEA

3. quatre stabilisateurs de type H assurent la stabilité de l'appareil. L'ensemble d'un stabilisateur comprend :
  - 1 poutre fixe solidaire du faux châssis ;
  - 1 poutre coulissante dont l'extension est assurée par un vérin ;
  - 1 vérin de stabilisation boulonné en extrémité de la poutre coulissante.
 Une semelle d'appui est reliée au vérin de stabilisation.
4. une tourelle basse fixée sur le faux châssis et équipée d'une couronne d'orientation. L'orientation de la tourelle est obtenue par un moteur hydraulique équipé d'un réducteur planétaire et d'un frein positif à manque de pression. Un joint tournant est situé dans l'axe de giration (comprenant les passages d'huile et les connexions électriques), permettant une rotation de la tourelle sur 360° en continu. Le poste de commande tourelle est situé à gauche de l'axe véhicule, il est équipé d'un poste de conduite avec siège reprenant tous les éléments de commande et de contrôle du bras élévateur.
5. le système de bras de l'élévateur comprend un ensemble de bras télescopiques. L'élément de base (bras inférieur) est articulé sur la tourelle (son débattement est de -7° à +80°). Les autres éléments coulissent entre eux. Le système d'extension flèche ainsi que la chaîne porte câble sont situés à l'intérieur des caissons et sont ainsi protégés.
6. le bras pendulaire comprend 2 éléments télescopiques et supporte à son extrémité la nacelle. Les fonctions d'extension et de rétractation du télescope sont obtenues par l'intermédiaire d'un vérin hydraulique à double effet. Ce bras est articulé par un vérin qui permet un débattement de -180° à 0°. Le débattement de ce bras permet ainsi des surplombs d'une grande efficacité.
7. la nacelle est suspendue à l'extrémité du bras pendulaire. Elle présente une surface de travail spacieuse. Elle est réalisée en profilés aluminium. Elle est supportée sur le bras pendulaire par une console. Elle comporte :
  - un plancher antidérapant ;
  - des anneaux de fixation pour harnais de sécurité ;
  - le poste de commande nacelle ;

- une pédale homme mort ;
- un interphone.

Un système de pivotement permet une rotation de +/- 50°.

Le verrouillage de la nacelle est « vérifié » par deux capteurs : un pour le portillon d'accès et un pour le pont-levis.

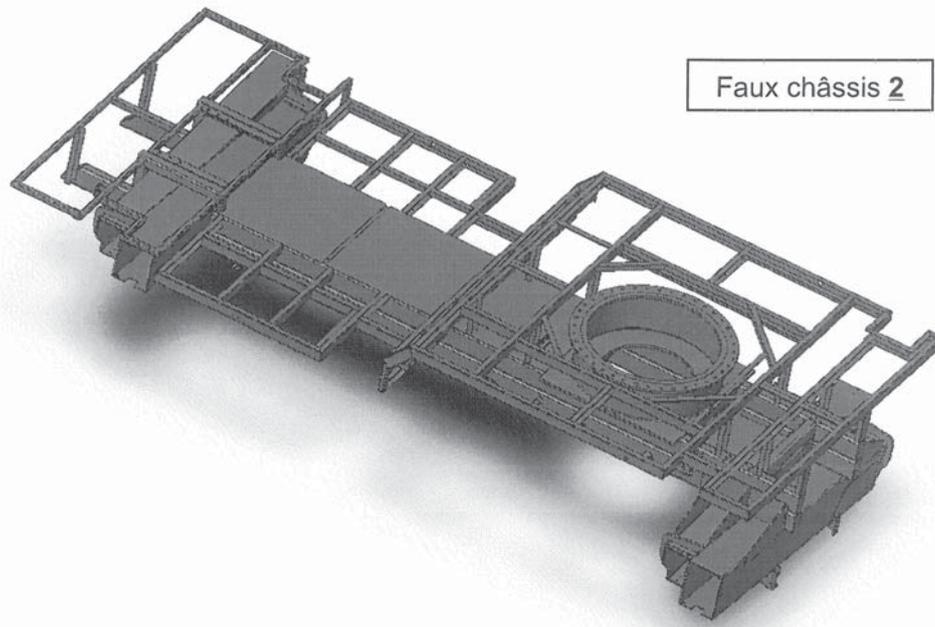


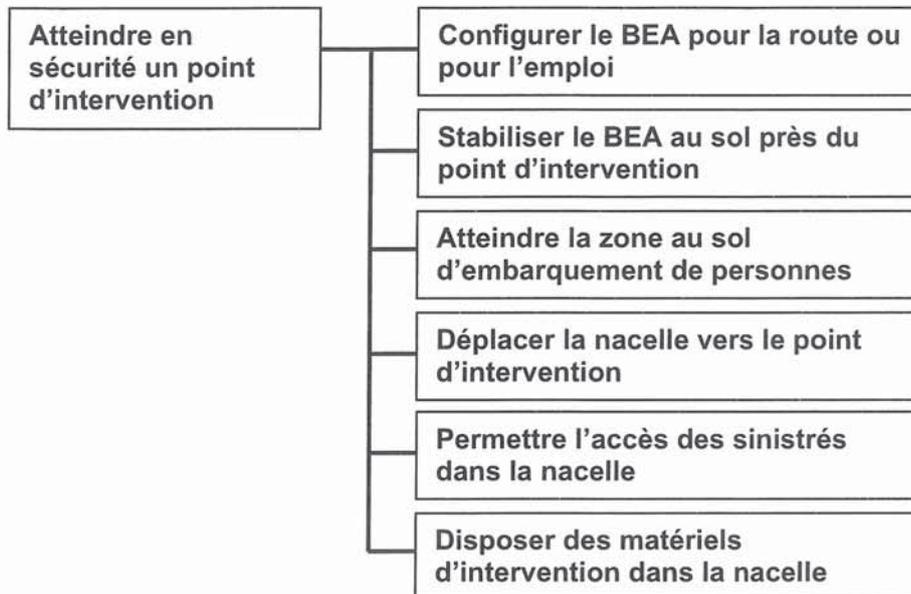
Figure 4 : structure du faux châssis

Le schéma cinématique et la nomenclature des sous-ensembles sont détaillés dans le document technique DT1.

## Partie 1 : Analyse globale du bras élévateur aérien

**Objectif** : construire un argumentaire de choix d'un véhicule de sauvetage.

Fonction globale du bras élévateur articulé



### *Contexte économique et industriel*

Le véhicule de sauvetage utilisé par les sapeurs-pompiers le plus connu du grand public est celui équipé d'une « grande échelle ». Celle-ci peut se déployer sur une longueur de 33 mètres environ. Le déploiement est basé sur le principe d'un système télescopique qui assure ainsi une grande sécurité pour le sauvetage à l'aide d'une nacelle fixée en son extrémité. La « grande échelle » permet :

- d'effectuer des sauvetages de personnes dans les étages lorsque les accès normaux sont difficiles ;
- d'acheminer des personnels et des matériels ;
- d'arroser le bâtiment en feu par l'extérieur.

En France, les sapeurs-pompiers utilisent une abréviation pour en parler :

- **EPSA** (échelle pivotante semi-automatique) qui est coulissante et ne peut faire qu'un seul mouvement à la fois de déploiement, d'élévation ou de rotation ;
- **EPA** (échelle pivotante automatique) qui est similaire aux EPSA mais qui peut effectuer plusieurs mouvements simultanément.

Les professionnels ont vu apparaître au début des années 80 des **BEA** (bras élévateur aérien). Ce dispositif de bras, bien que n'étant pas une échelle, est muni d'une grande plate-forme en son extrémité pouvant recevoir une charge importante en hauteur. Ses avantages sont :

- d'accéder aisément et au plus près des points d'intervention ;
- d'avoir une plate-forme de travail possédant un canon-lance immédiatement utilisable et des projecteurs lumineux.

Son inconvénient principal est une mise en œuvre moins rapide que les échelles, l'empêchant d'être employé comme engin de sauvetage. À l'usage, les BEA sont moins nombreux que les EPA.

Mais récemment de nouveaux véhicules ont été équipés d'un bras élévateur aérien et doublé d'une échelle pour faciliter l'évacuation en hauteur de personnes en situation de danger. Ces véhicules offrent le meilleur compromis.

**Problème :** l'entreprise qui fabrique du matériel pour le secours des personnes et la protection des biens propose une gamme d'engins capables de répondre aux besoins des professionnels de la lutte contre les incendies et de sauvetage. Ces besoins sont définis par :

- la rapidité d'accès sur les lieux ;
- la capacité à s'adapter à l'environnement proche du sinistre ;
- la capacité d'atteindre le point d'observation, d'attaque du feu et/ou d'évacuation des victimes ;
- la rapidité d'intervention après l'immobilisation de l'engin au sol ;
- la facilité d'évacuation des victimes ;
- la rigidité face à la force développée par le jet d'eau pour l'attaque du feu ;
- la stabilité face aux perturbations extérieures ;
- ...

Il s'agit pour l'entreprise d'établir un argumentaire qui présente les avantages et les inconvénients d'un véhicule équipé d'un bras articulé.

En ce qui concerne la capacité à s'adapter à l'environnement proche du sinistre, l'illustration suivante montre que la grande échelle accède au point d'intervention en ligne droite à une distance radiale de l'engin de 15 à 20 mètres selon la charge embarquée.

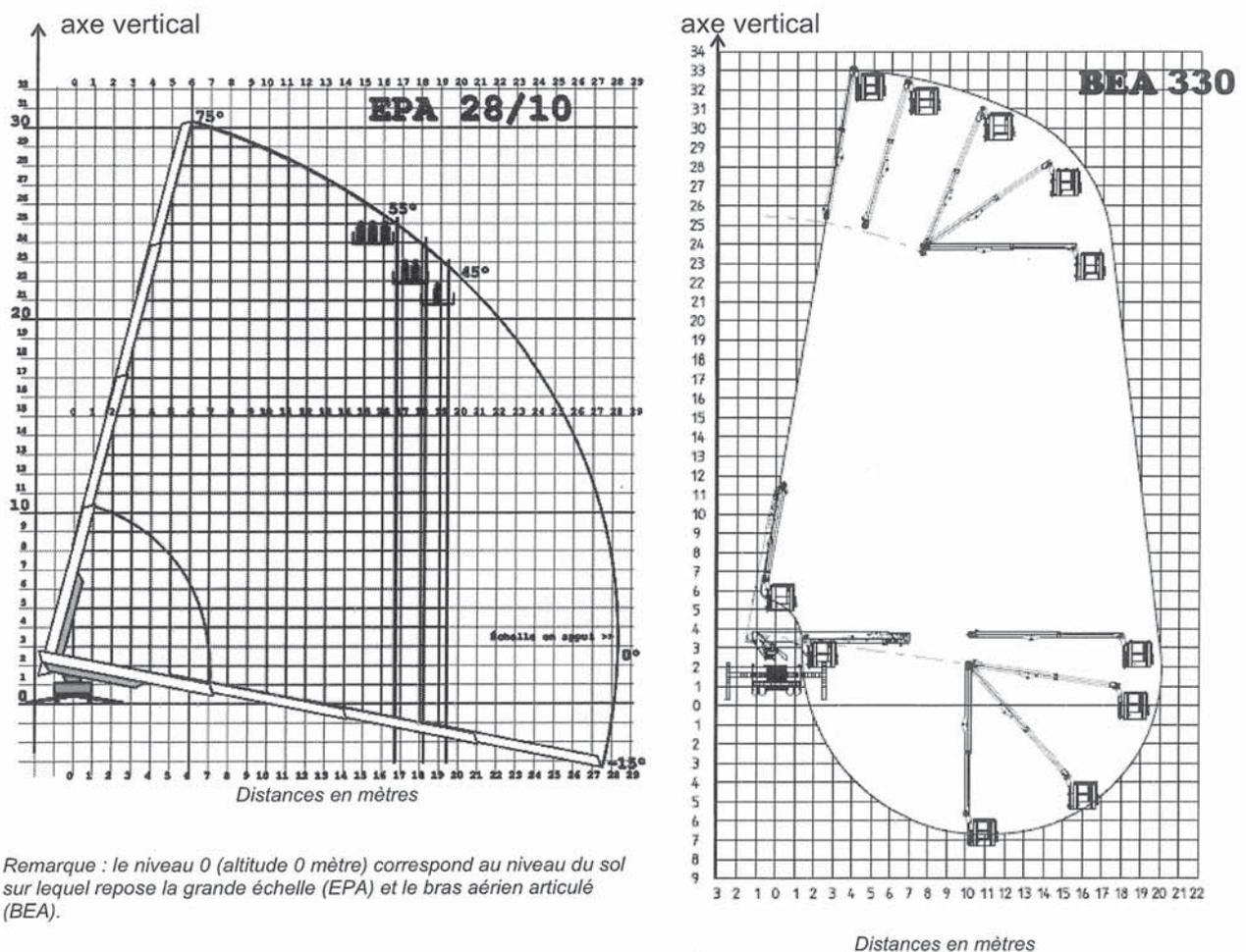


Figure 5 : courbes d'évolution de la portée transversale d'une grande échelle et du BEA étudié

### Question 1

À l'aide du graphique ci-dessus qui représente la portée transversale maximale d'un BEA, présenter plusieurs situations comprenant obstacles (arbre, toit, mur,...) et/ou dangers (lignes électriques,...) qui justifient l'utilité d'un tel engin pour atteindre le point d'intervention (balcon d'immeuble, fenêtre de toit,...) au plus près.

En ce qui concerne la rapidité d'intervention, le temps d'accès au point d'intervention à partir du point d'immobilisation au sol du BEA dépend de la durée totale des différentes phases :

- déploiement du BEA à partir de la configuration de route (compacité de l'engin due aux dimensions hors tout inférieures à 8,3 m en longueur, à 2,5 m en largeur et 2,8 m en hauteur) ;
- embarquement au sol de deux professionnels chargés pour l'un de la commande du mouvement de la nacelle et pour l'autre de la préparation de l'opération d'intervention ;
- accès de la nacelle parcourant une trajectoire allant de la zone d'embarquement vers le point d'intervention et contournant les obstacles (la rotation  $R_t$  de la tourelle, la rotation du bras télescopique  $R_e$ , la translation  $T_e$  du bras télescopique, la rotation  $R_b$  du bras pendulaire et la translation  $T_b$  du bras pendulaire sont impliquées) ;
- ajustement de la nacelle au point d'évacuation (la rotation d'axe vertical de la nacelle par rapport au bras articulé est alors utilisée).

Lors du parcours de la trajectoire zone d'embarquement/intervention, le temps dépend des obstacles à contourner, de la compétence du responsable de la manœuvre au poste de commande (près du sol) et des possibilités techniques du BEA (mouvements simultanés ou non des différents éléments). L'expérience obtenue par l'entraînement de l'échelier garantit une bonne optimisation de la durée du déplacement. Cette trajectoire peut être enregistrée pour être reproduite en sens inverse, de manière automatique pour rejoindre le point d'intervention au plus vite.

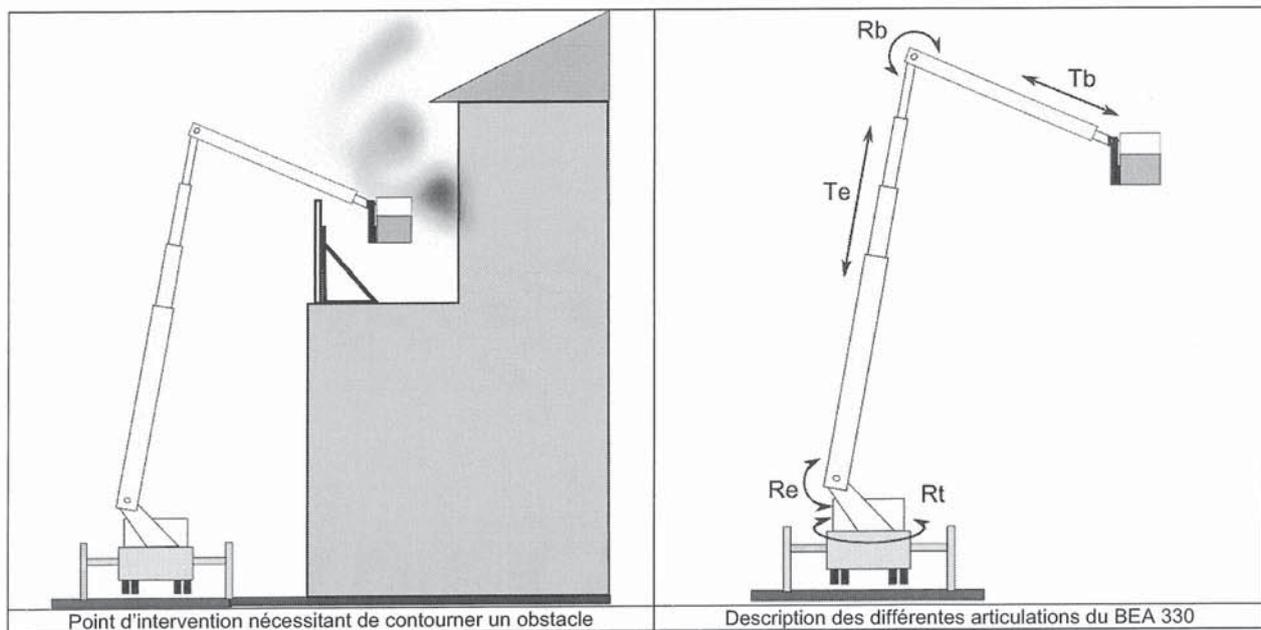


Figure 6 : articulations du BEA

### Question 2

Proposer, avec un outil de description adapté, plusieurs exemples d'ordonnancement possible de manœuvre des éléments principaux de BEA (rotation  $R_t$  de la tourelle/châssis, élévation  $R_e$  et translation  $T_e$  du bras télescopique, rotation  $R_b$  et translation  $T_b$  du bras pendulaire) pour atteindre le point d'intervention depuis le point de fixation de l'engin. En dégager un qui a une durée d'accès court.

### Données

- taux de rotation de la tourelle par rapport au châssis de l'engin :  $\Omega_t = 0,1 \text{ rad/s}$  ;
- taux de rotation moyen du télescope par rapport à la tourelle :  $\Omega_{e\text{moyen}} = 0,05 \text{ rad/s}$  ;
- vitesse de translation d'une extrémité de l'échelle par rapport à l'autre :  $V_e = 1 \text{ m/s}$  ;
- taux de rotation moyen du bras pendulaire par rapport au télescope :  $\Omega_{b\text{moyen}} = 0,2 \text{ rad/s}$  ;
- vitesse de translation d'une extrémité du bras pendulaire par rapport à l'autre :  $V_b = 1 \text{ m/s}$  ;

- les 4 éléments du télescope ont une longueur de 6 m environ et se déploient sur 5 m environ ;
- les 2 éléments du bras pendulaire ont une longueur de 4,5 m environ et le second se déploie sur 3 m environ.

En ce qui concerne la facilité d'évacuation des victimes, l'engin EPA, équipé d'une grande échelle, permet plus facilement l'évacuation continue des personnes. Cela constitue un avantage important si le nombre de personnes capables d'emprunter l'échelle est important (au-delà de 4). Quant au bras articulé BEA, il possède toujours une nacelle qui permet de recevoir un ou plusieurs sinistrés ; leur nombre est limité par la charge maximale supportée par la nacelle. Ils seront déposés au sol après le verrouillage des portes d'accès à la nacelle. Cette limite de charge est définie par les prescriptions d'une norme européenne EN 1777 sur les bras élévateurs aériens utilisés par les services d'incendie et de secours.

*Extrait de la norme :* « La charge nominale est constituée de personnes, ayant chacune une masse nominale de 90 kg et de tous les équipements portables sur la plateforme, dans les limites de l'enveloppe de travail correspondante. La masse de chaque personne doit être assimilée à une charge ponctuelle agissant à une distance horizontale de 0,1 m du bord de la nacelle, la distance entre les charges ponctuelles étant égales à 0,5 m. La masse des équipements portables doit être assimilée à une charge uniformément répartie sur 25 % du plancher de la plateforme. Toutes les charges doivent être calculées dans les positions et combinaisons produisant les résultats les plus défavorables. »

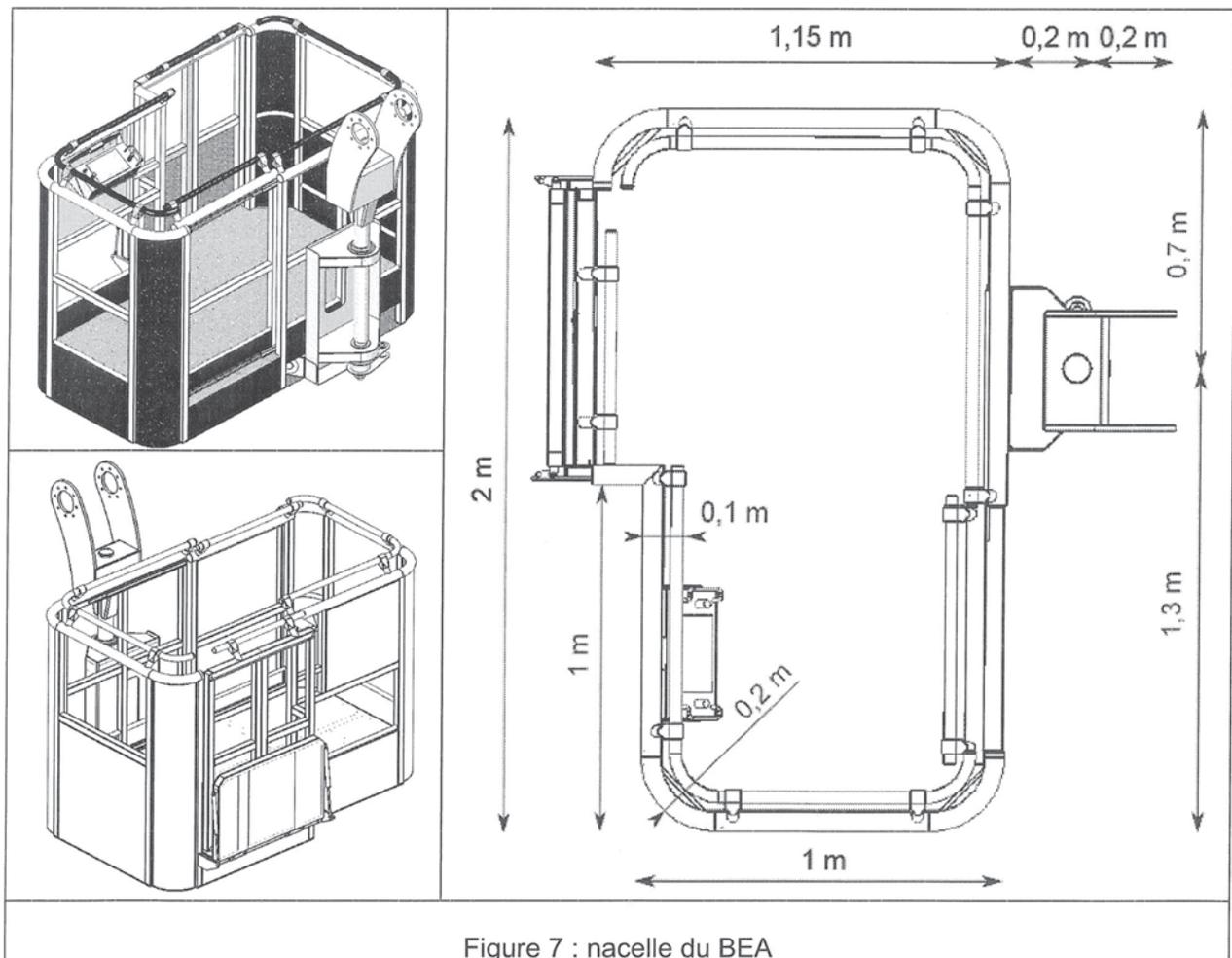


Figure 7 : nacelle du BEA

### Question 3

Vérifier que la plateforme peut recevoir cinq personnes au point de vue de ses dimensions et au regard de la norme. Proposer, en vous appuyant sur les dessins de nacelle ci-dessus, une configuration défavorable de la charge supportée par la nacelle et définir son modèle global.

En ce qui concerne la capacité d'atteindre un point d'observation le plus adapté pour une intervention efficace, le BEA possède une articulation importante entre le bras pendulaire et le télescope modélisée par une liaison pivot d'axe horizontal. L'amplitude du mouvement du bras pendulaire par rapport au télescope est donnée par la position extrême de la configuration « route » ( $-180^\circ$ ) et par celle du déploiement maximum ( $0^\circ$ ). Le mouvement est conditionné par les éléments de la chaîne d'énergie dans laquelle l'actionneur est un vérin hydraulique linéaire. Cet actionneur, quoique encombrant en longueur, possède des dimensions transversales beaucoup plus faibles pour le loger facilement le long d'un bras.

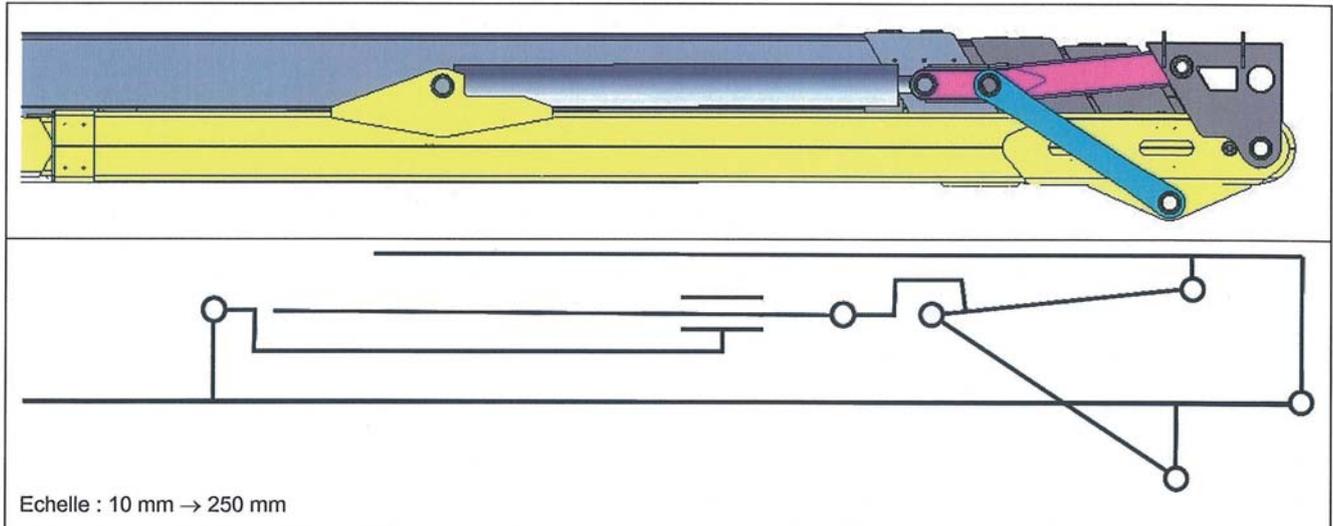


Figure 8 : articulation flèche télescopique – bras pendulaire en configuration « route »

#### **Question 4**

Représenter, à l'aide d'un schéma cinématique, la position du bras pendulaire donnée par le débattement maximum et en déduire la longueur utile de la tige du vérin. Représenter sur ce même schéma cinématique un autre vérin dont le point d'ancrage serait fixé sur le dernier élément du télescope et conclure sur l'intérêt et les conséquences d'une telle solution constructive. (Citer le phénomène que l'on peut craindre pour un vérin de cette longueur)

## Partie 2 : Analyse et conception de l'orientation de la tourelle

**Objectif :** choisir l'actionneur hydraulique ; choisir la couronne d'orientation ; concevoir la liaison tourelle/support

La fonction « orienter la tourelle » se retrouve dans de nombreuses applications, notamment dans les domaines des travaux publics ou encore militaires. La puissance nécessaire et disponible sur les différents engins est en général de type hydraulique. C'est aussi le cas pour le BEA étudié.

### Chaîne de commande et d'action de l'axe de la tourelle

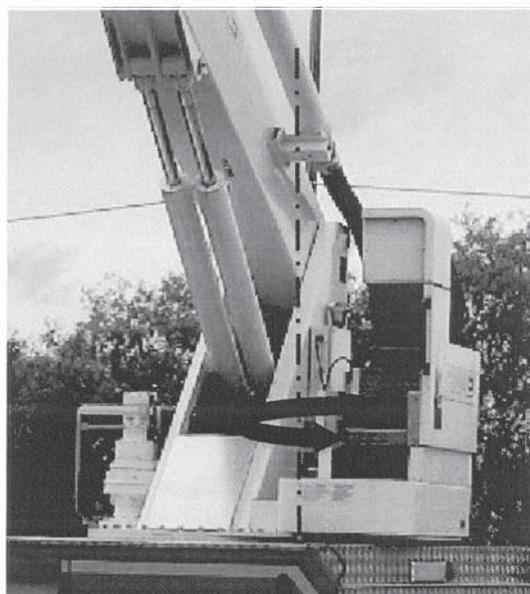
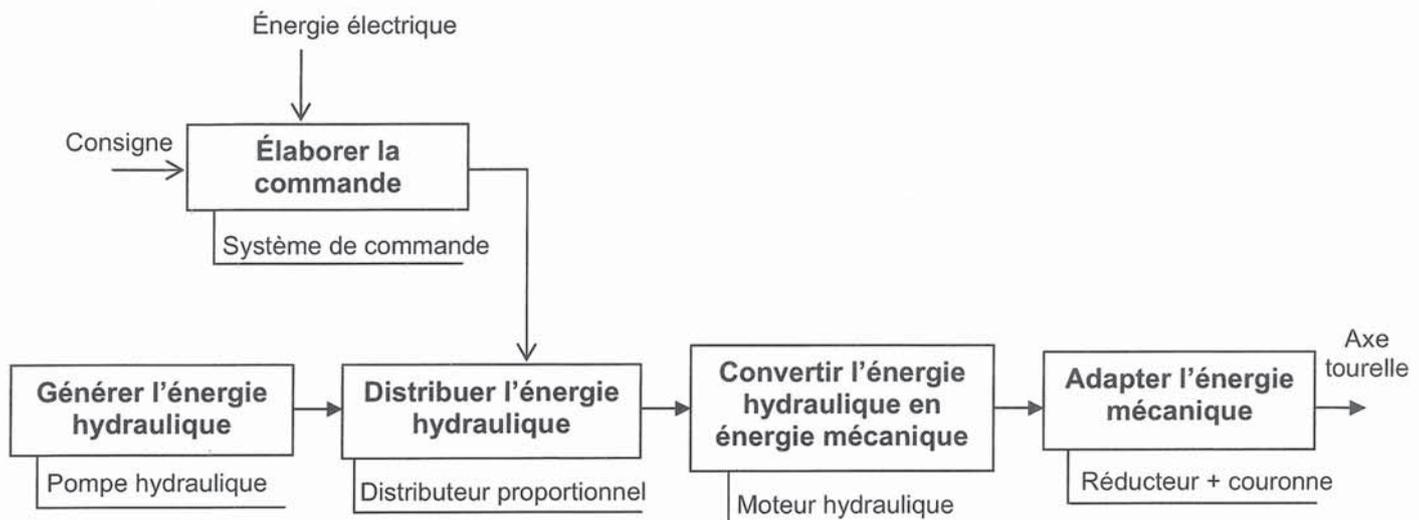


Figure 9 : rotation de la tourelle du BEA

Le schéma ci-dessus présente les fonctions et les solutions utilisées pour la conduite de l'axe de la tourelle du BEA. Celui-ci est asservi en position et en vitesse.

### Question 5

Proposer, sous forme de schéma bloc, le principe de la réalisation de ces asservissements. Les blocs seront les noms des solutions technologiques utilisées (voir ci-dessus). Les informations transférées entre les blocs seront indiquées sous forme de paramètres dont la signification et les unités seront précisées.

## Dimensionnement en puissance

L'objectif de cette sous-partie concerne le dimensionnement de l'actionneur hydraulique en tenant compte des limitations des organes de la chaîne.

Dans un premier temps, afin de déterminer la puissance nécessaire qui sera développée par le moteur hydraulique d'orientation de la tourelle du BEA ainsi que le couple utile sur l'axe de rotation, une étude énergétique va être menée sur la charge à mouvoir.

Le repère  $R_0 = (O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ , supposé galiléen, est lié au porteur. Le repère  $R = (O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$  est lié à la tourelle. Il est défini sur la figure 10. La norme de l'accélération de la pesanteur sera égale à  $9,81 \text{ m/s}^2$ .

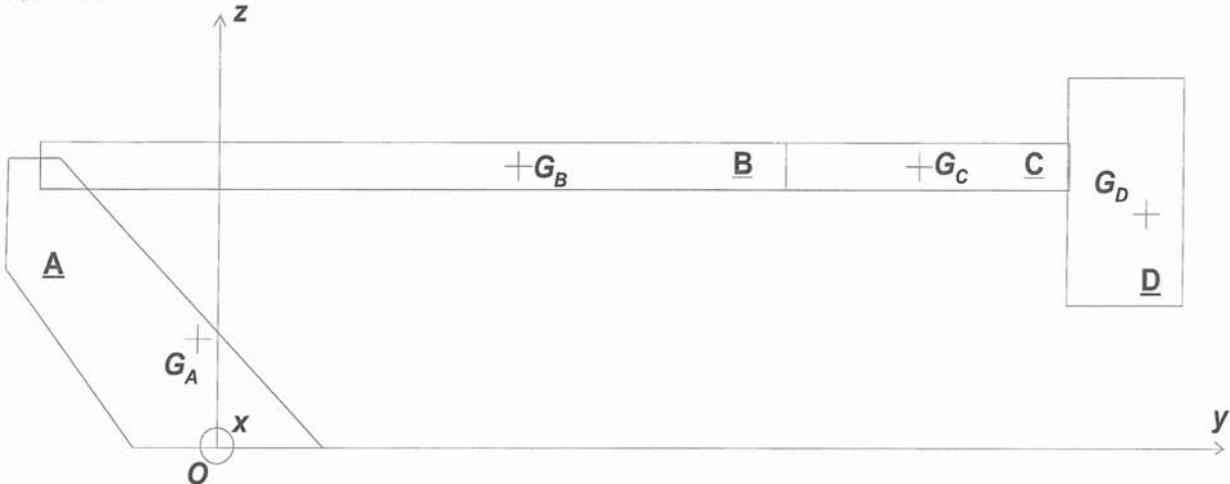


Figure 10 : éléments constitutifs du bras

La liaison pivot d'axe  $(O, \vec{z}_0)$  entre le porteur et la tourelle est repérée par l'angle  $\theta = (\vec{x}_0, \vec{x}) = (\vec{y}_0, \vec{y})$ .

On se place dans la **situation défavorable** pour laquelle le bras est déplié à son maximum pour la position horizontale (repérée B sur la courbe S3, Document Technique DT2). On définit quatre sous-ensembles pour le dimensionnement envisagé (voir figure 10 et tableau 1 ci-dessous).

La norme NF EN 1777 définit les différents chargements à prendre en compte lors de la conception des Bras Élévateurs Aériens. Outre les charges dues aux masses en mouvement (personnes, matériels, structure du BEA), il est nécessaire de prendre en compte les effets du vent sur le bras (supposés résistants). La norme précise que la charge appliquée est supposée constante et uniformément répartie sur la surface latérale de valeur  $p = 100 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$  ce qui correspond à un vent de vitesse  $v = 12,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (niveau 6 sur l'échelle de Beaufort). Afin de ne pas alourdir les calculs, nous supposons que le vent agit sur la surface indiquée à la figure 11. Les liaisons entre les sous-ensembles sont supposées parfaites.

Le profil de la fréquence de rotation de la tourelle est donné sur le graphique de la figure 12.

<p>Tourelle 1 + vérins de flèche</p> <p>Solide <b>A</b></p>	<p>Centre d'inertie <math>G_A</math> tel que  <math>\vec{OG}_A = -152\vec{y} + 575\vec{z}</math> (mm)</p> <p>Masse <math>m_A</math> telle que  <math>m_A = 1550 \text{ kg}</math></p> <p>Matrice d'inertie en <math>G_A</math> telle que</p> $I(G_A, \underline{A}) = \begin{pmatrix} 682 & 7 & 37 \\ 7 & 275 & 69 \\ 37 & 69 & 603 \end{pmatrix}_{(G_A, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	
---	---	--

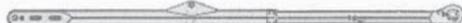
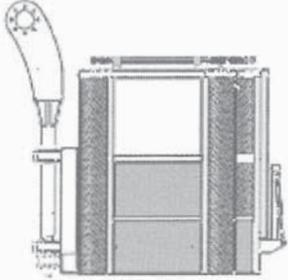
<p>Flèche + coulisse intermédiaire + coulisse finale + coulisseau + « ciseau » + vérin de bras</p> <p>Solide <b>B</b></p>	<p>Centre d'inertie <math>G_B</math> tel que  <math>\vec{OG}_B = 4247\vec{y} + 1595\vec{z}</math> (mm)</p> <p>Masse <math>m_B</math> telle que  <math>m_B = 2650</math> kg</p> <p>Matrice d'inertie en <math>G_B</math> telle que  <math>I(G_B, \underline{B}) = \begin{pmatrix} 13374 &amp; 166 &amp; -7 \\ 166 &amp; 112 &amp; 115 \\ -7 &amp; 115 &amp; 13346 \end{pmatrix}_{(G_B, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})}</math> kg·m<sup>2</sup></p>	
<p>Bras pendulaire + coulisseau pendulaire</p> <p>Solide <b>C</b></p>	<p>Centre d'inertie <math>G_C</math> tel que  <math>\vec{OG}_C = 14699\vec{y} + 1595\vec{z}</math> (mm)</p> <p>Masse <math>m_C</math> telle que  <math>m_C = 525</math> kg</p> <p>Matrice d'inertie en <math>G_C</math> telle que  <math>I(G_C, \underline{C}) = \begin{pmatrix} 2842 &amp; -3 &amp; 0 \\ -3 &amp; 363 &amp; -7 \\ 0 &amp; -7 &amp; 2842 \end{pmatrix}_{(G_C, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})}</math> kg·m<sup>2</sup></p>	
<p>Nacelle + axe + hommes et matériels</p> <p>Solide <b>D</b></p>	<p>Centre d'inertie <math>G_D</math> tel que  <math>\vec{OG}_D = 18560\vec{y} + 863\vec{z}</math> (mm)</p> <p>Masse <math>m_D</math> telle que  <math>m_D = 825</math> kg</p> <p>Matrice d'inertie en <math>G_D</math> telle que  <math>I(G_D, \underline{D}) = \begin{pmatrix} 421 &amp; -34 &amp; 7 \\ -34 &amp; 363 &amp; -62 \\ 7 &amp; -62 &amp; 347 \end{pmatrix}_{(G_D, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})}</math> kg·m<sup>2</sup></p>	

Tableau 1 : éléments cinétiques du bras

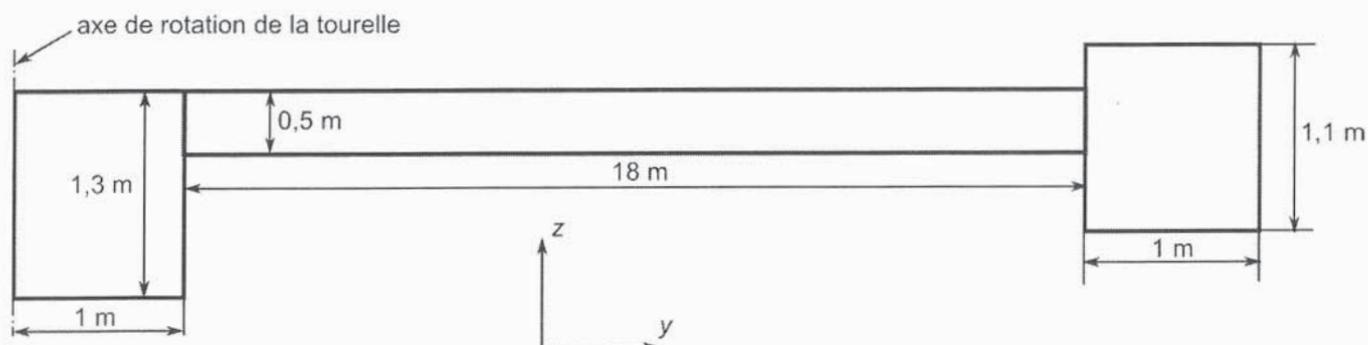


Figure 11 : dimension des éléments du bras

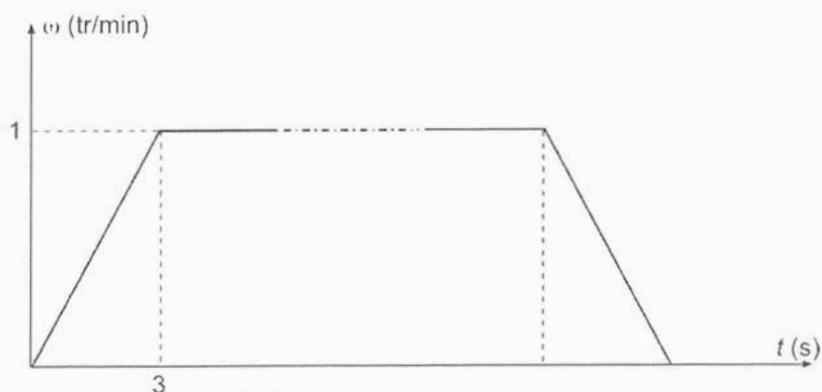


Figure 12 : profil de la fréquence de rotation de la tourelle

### Question 6

À l'aide des éléments présentés ci-dessus, calculer la puissance nécessaire sur l'axe de la tourelle afin de procéder par la suite au choix de l'actionneur. En déduire le couple nécessaire au niveau de l'axe de la tourelle.

### Limites dues aux éléments de la chaîne d'énergie de l'actionneur hydraulique en régime établi

Le choix des éléments de la chaîne d'énergie du moteur hydraulique impose des limitations technologiques qui ne seront pas compensées par les lois de commande. Nous allons caractériser les éléments en puissance et étudier les limites inhérentes à chacun d'eux.

#### Limites dues au distributeur hydraulique

On souhaite déterminer la limite de puissance imposée par le distributeur à la transmission hydraulique lors de l'orientation de la tourelle.

La figure 13 présente le schéma de principe d'un distributeur hydraulique. Celui-ci agit en insérant deux restrictions modulées par le signal de commande ( $U$ ), sur le trajet du fluide « alimentation → moteur → retour ».

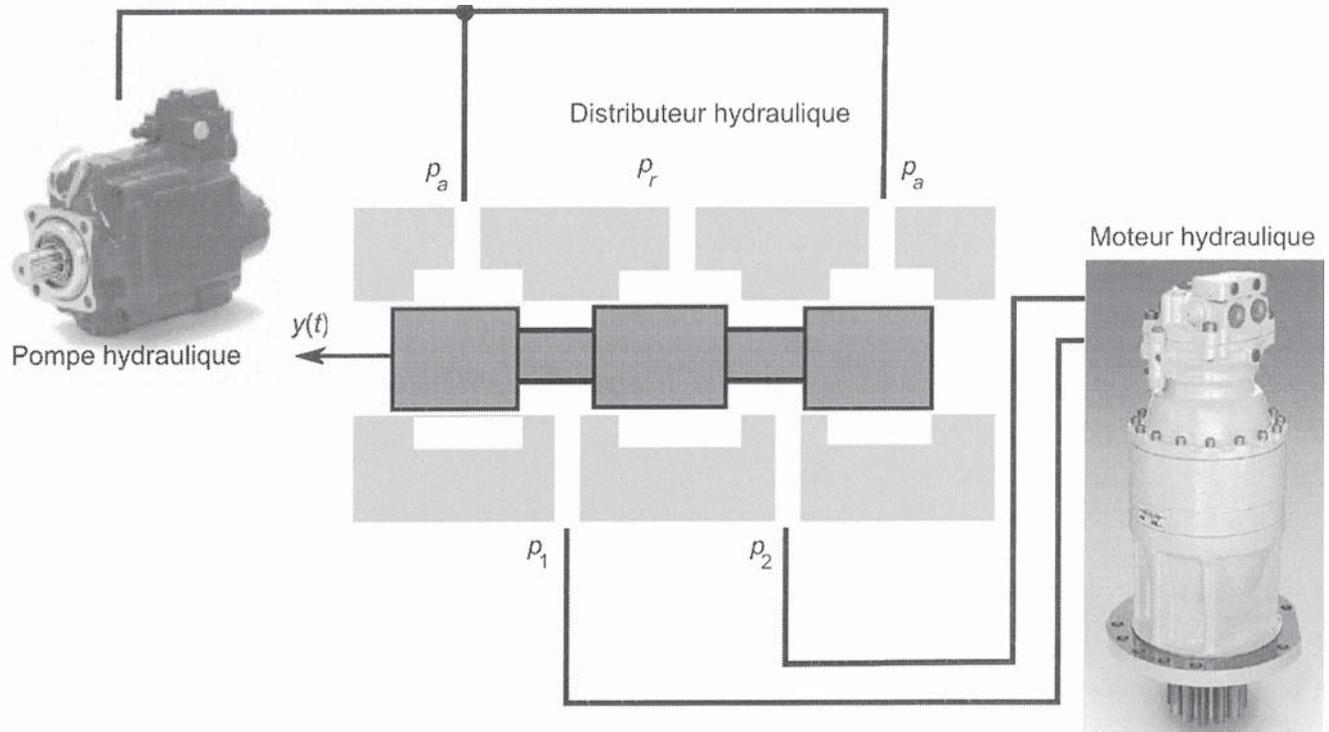


Figure 13 : schéma de principe du distributeur hydraulique

Des hypothèses simplificatrices (pas de surpression, pas de cavitation, ...) conduisent à montrer que le débit moyen instantané traversant le distributeur vaut :

$$q = q_0 \frac{U}{U_0} \sqrt{\frac{p_u - \Delta p \operatorname{sgn}(U)}{p_0}} \quad \text{avec} \quad \operatorname{sgn}(U) = \begin{cases} = 1 & \text{si } U > 0 \\ = -1 & \text{si } U < 0 \\ = 0 & \text{si } U = 0 \end{cases}$$

Les paramètres pour le calcul de la puissance transmissible par le distributeur hydraulique sont :

$p_a$  : pression d'alimentation  
 $p_r$  : pression de refoulement  
 $p_u = p - p_0$  : pression utile

$p_0$  : pression nominale  
 $p_1$  : pression à l'entrée du moteur hydraulique  
 $p_2$  : pression à la sortie du moteur hydraulique  
 $\Delta p = p_1 - p_2$  : pression différentielle  
 $U$  : tension de commande  
 $U_0$  : tension de commande nominale  
 $q_0$  : débit nominal du distributeur

Les données numériques et la courbe constructeur (DENISSON) débit/pression (figure 14) du distributeur (01/51) utilisé pour remplir la fonction sont présentées ci-dessous.

$$U_0 = 12 \text{ V}, p_0 = 130 \text{ bar}, q_0 = 90 \text{ L/min}, p_U = 315 \text{ bar}$$

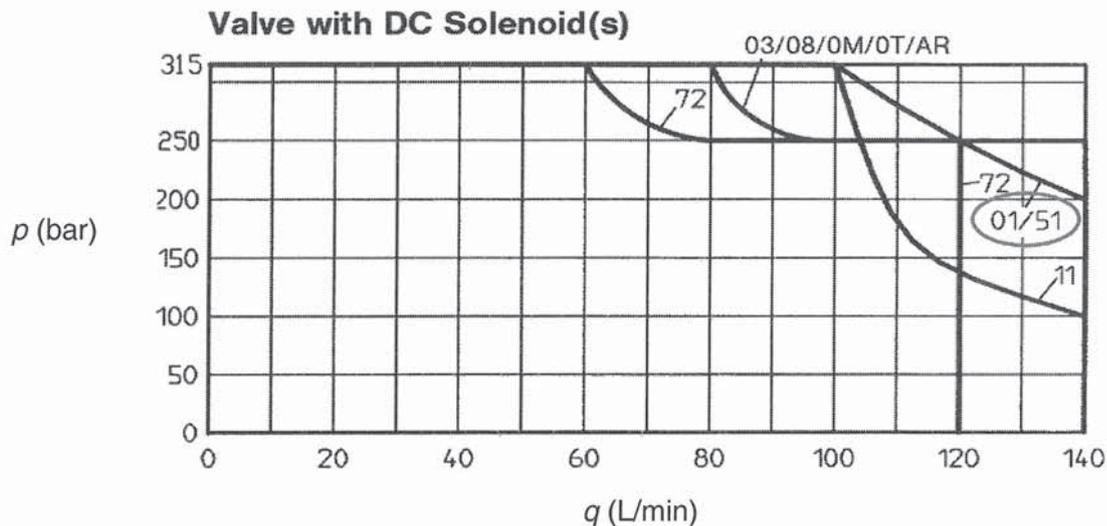


Figure 14 : caractéristiques débit/pression du distributeur étudié

### Question 7

Déterminer, pour une valeur de  $U$  imposée, la valeur de la pression différentielle pour laquelle la puissance transmissible par le distributeur est maximale. En déduire la puissance maximale théorique transmissible par le distributeur pour  $U = U_0$ . Vérifier que celle-ci peut être atteinte par le préactionneur choisi.

### Question 8

Proposer une définition du rendement du distributeur et donner sa valeur numérique pour la puissance maximale transmissible par le distributeur.

Nous supposons pour la suite que le rendement du distributeur est constant et égal à  $\eta_d = 66 \%$ .

### Limites dues au moteur hydraulique et au réducteur – vérification de la pompe

Les mouvements (stabilisation, orientation, bras télescopique, bras pendulaire, et nacelle) étant indépendants, on vérifierait que l'orientation de la nacelle est le mouvement dimensionnant le circuit hydraulique. La pompe choisie a pour référence HYDRO LEDUC TXV 120 (Document Technique DT3).

En phase de conception, les valeurs des rendements des organes présents dans le circuit hydraulique ne sont pas connues. Il est cependant intéressant de les introduire dans le modèle de calcul. On négligera les pertes de charges singulières et régulières dans les canalisations.

### Question 9

Indiquer des ordres de grandeur pour les rendements suivants : couronne, réducteur épicycloïdal, mécanique d'une pompe hydraulique, volumétrique d'une pompe hydraulique. En déduire la valeur de l'ordre de grandeur de la puissance nécessaire à l'entrée de la pompe. Vérifier à l'aide du

Document Technique DT3 que le modèle utilisé est convenable du point de la puissance disponible.

### **Arrêt de l'orientation du bras élévateur aérien**

Le freinage progressif et l'arrêt de la tourelle doivent se faire de manière « confortable » pour les passagers présents dans la nacelle et ne pas engendrer de flèche trop importante pendant cette phase. On se place toujours dans la position B repérée sur la courbe S3 (Document Technique DT2). On cherche ici à évaluer le comportement vibratoire de la nacelle complètement chargée en isolant deux paramètres influençant ce comportement :

- élasticité du bras télescopique ;
- compressibilité de l'huile – utilisation d'un système anti rebond.

*Effet des vibrations du bras pendant la phase d'arrêt de la rotation de la tourelle*

Même si les logiciels permettent de réaliser des simulations du comportement des structures élastiques en mode dynamique, il peut être utile de connaître un ordre de grandeur des évolutions comportementales des systèmes étudiés. On cherche ici à déterminer le comportement de la nacelle dû à l'élasticité du bras lors de l'arrêt de la tourelle.

#### **Question 10**

Proposer un modèle simple pour étudier le comportement du bras télescopique pendant la phase d'arrêt de la tourelle. Un schéma sera précisé ainsi que toutes les hypothèses de calcul et la mise en équations. **Il ne vous est pas demandé de les résoudre.**

La résolution des équations précédentes, dans la position horizontale la plus défavorable, par une méthode de Rayleigh-Ritz ou une simulation à l'aide d'une méthode par éléments finis conduit au résultat suivant :

- ordre de grandeur de la fréquence fondamentale des vibrations : 1 Hz ;
- amplitude des vibrations associées : 0,4 m à l'extrémité.

#### **Question 11**

Analyser et commenter ce résultat. Le cas échéant, si une évolution est envisagée, la présenter succinctement

*Effet de l'anti rebond présent dans le circuit hydraulique d'orientation de la tourelle*

À l'instar d'une transmission hydrostatique, les branches de puissance dans le circuit hydraulique d'orientation de la tourelle s'inversent durant la phase d'arrêt de la tourelle. Il faut veiller à ce que cette situation ne provoque pas de cavitation dans le circuit d'orientation. Il faut également prévoir une dissipation progressive de l'énergie cinétique afin de conserver le confort d'utilisation. Il est donc utile de commencer la dissipation à basse pression, puis ensuite à pression plus élevée. Il est également important d'éviter d'éventuels rebonds au moment de l'arrêt de la tourelle, en égalisant les pressions dans les 2 branches. En dernier lieu, le frein de tourelle devra être appliqué après l'arrêt définitif de l'orientation. Ces dispositions doivent pouvoir avoir lieu quelle que soit la fréquence de rotation initiale.

Le Document Technique DT4 propose le schéma hydraulique de l'orientation de la tourelle. Le Document Technique DT5 présente le dispositif anti rebond. Quatre phases du circuit hydraulique sont détaillées pour ce qui concerne l'évolution des pressions dans la zone concernée. Les principaux orifices sont repérés afin de faciliter les explications demandées ci-après.

#### **Question 12**

Expliquer le fonctionnement du système anti rebond et en quoi il réalise la fonction souhaitée pour l'ensemble de la tourelle.

Les courbes des Documents Techniques DT6 et DT7 représentent respectivement l'évolution des pressions suivant les deux sens de rotation, le premier (rotation horaire) traduisant un fonctionnement normal du système anti rebond, le second (rotation antihoraire) montrant cette évolution en cas de défaut du système anti rebond. Dans chacun des graphiques, les courbes sont celles de la pression dans les 2 branches de puissance alimentant le moteur d'orientation durant un mouvement de celui-ci.

Cas du fonctionnement normal

- $1\text{ s} \leq t \leq 4\text{ s}$  : phase d'accélération initiale de la tourelle ;
- $4\text{ s} \leq t \leq 7\text{ s}$  : phase de régime permanent ;
- $t = 7\text{ s}$  : arrêt de la commande du mouvement ;
- $t = 8,5\text{ s}$  : arrêt de la tourelle.

### **Question 13**

Expliquer en quoi le phénomène de rebond est annihilé par le système des deux valves. Expliquer ensuite pourquoi dans le sens antihoraire (défaut) le phénomène de rebond apparaît.

### **Analyse et conception de l'installation de la tourelle sur le support**

On se propose maintenant d'étudier l'interfaçage entre le porteur et le BEA. Les fonctions techniques réalisées par cet interfaçage sont :

1. relier la tourelle au châssis du porteur ;
2. permettre la rotation de la tourelle ;
3. assurer l'orientation de la tourelle par rapport au porteur ;
4. permettre le passage de l'énergie hydraulique du porteur vers le BEA ;
5. permettre le passage de l'énergie électrique du porteur vers le BEA ;
6. permettre le passage du fluide de lutte contre un incendie.

#### *Actions mécaniques transmises par la tourelle au porteur*

Le faux châssis est constitué de poutrelles de différentes sections reliées entre-elles afin de constituer une armature suffisamment rigide pour supporter l'ensemble des efforts auxquels est soumis le BEA. Ce faux châssis est monté sur le porteur constituant ainsi, ensemble, la structure sur laquelle sera « posée » l'ensemble « tourelle, flèche, bras et nacelle ». Les vues tridimensionnelles du Document Technique DT8 montrent la tourelle et le faux châssis et particulièrement la zone de liaison du faux châssis avec l'ensemble complet qui vient d'être cité ci avant. Une couronne d'orientation sera interposée entre ces deux sous-ensembles.

### **Question 14**

Afin de valider le choix de la couronne d'orientation en phase statique, déterminer le torseur des actions mécaniques au niveau de la liaison entre la tourelle et le faux châssis dans la position B du Document Technique DT2. On ne prendra en compte que les éléments utiles du Tableau 1 (ci-avant). L'action du vent n'est pas considérée ici.

#### *Validation du choix de la couronne d'orientation*

Les deux premières fonctions techniques citées ci-dessus sont réalisées par une couronne d'orientation conçue et fabriquée par la société ROLLIX. Les références et le plan de la couronne montée sur le BEA étudié ici sont donnés dans le Document Technique DT9. La courbe de capacité de charge de la couronne utilisée est fournie dans le Document Technique DT10. La notice de calcul de la fonction roulement de la société ROLLIX est fournie dans le Document Technique DT11.

### **Question 15**

Vérifier à partir du calcul précédent et des deux documents techniques venant d'être cités, que la couronne choisie convient pour ce qui concerne la capacité de charge. Estimer également la durée de service pour une rotation de la tourelle de 1 tour/minute (valeur estimée par le fabricant).

*Proposition de solution pour réaliser la liaison « faux châssis/tourelle » du BEA*

Nous avons noté que les deux premières fonctions techniques citées ci-dessus sont réalisées par l'intermédiaire de la couronne d'orientation.

### **Question 16**

Préciser une solution pouvant être utilisée pour remplir chacune des fonctions techniques 4 et 5 ci-dessus. Proposer un dessin de principe, à main levée, expliquant le fonctionnement de chaque solution.

Le Document Technique DT12 présente au format A3 quatre vues de la zone de liaison de la tourelle avec le porteur (faux châssis) – voir également le Document Technique DT8 –. Le Document Réponse DR1 présente la vue de droite partielle issue de ce Document Technique. L'échelle de ce document n'est pas indiquée mais les proportions des éléments sont conservées.

### **Question 17**

Proposer, sur le Document Réponse DR1, un dessin à main levée de l'architecture des solutions constructives du montage de la tourelle sur le faux châssis réalisant les six fonctions citées ci-dessus. Il s'agit ici de présenter les éléments dans leur globalité, en position, sans entrer dans le détail précis des choix réalisés pour les éléments.