

SESSION 2013

**CAPET
CONCOURS EXTERNE
ET CAFEP**

**Section : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR
Option : INGÉNIERIE MÉCANIQUE**

**ÉTUDE D'UN SYSTÈME, D'UN PROCÉDÉ
OU D'UNE ORGANISATION**

Durée : 5 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.

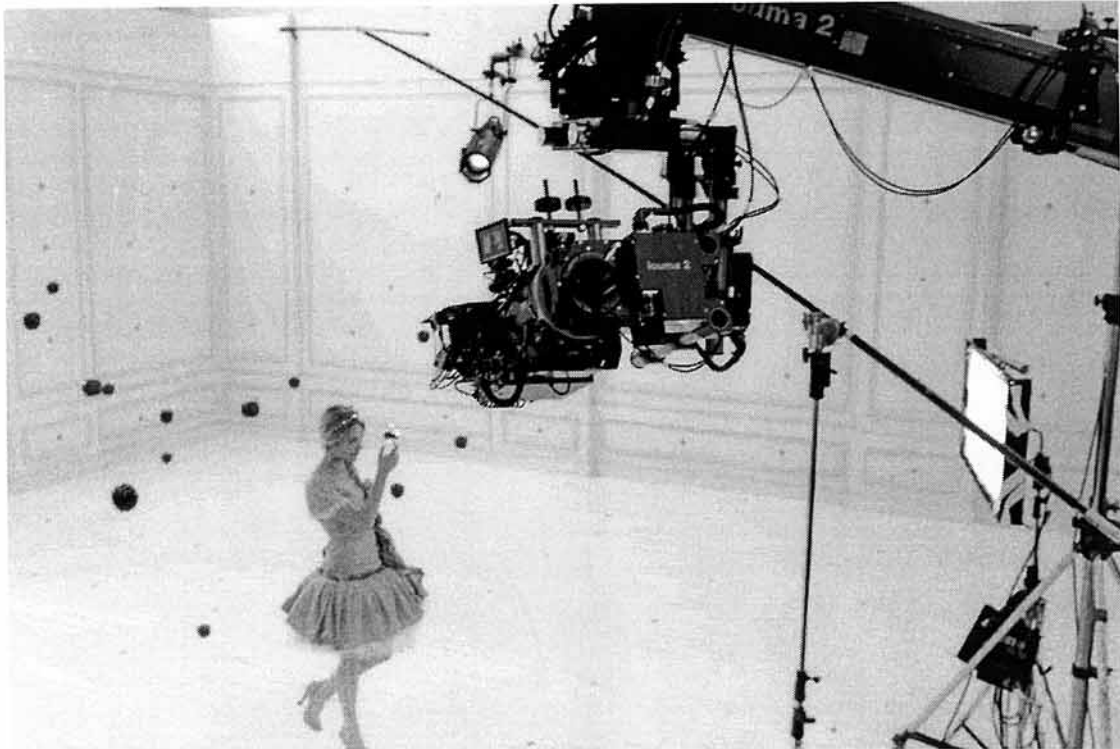
De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.

NB : 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

Grue de prise de vue de cinéma – la LOUMA 2



Tournage d'une publicité pour le parfum Nina Elixir de Ninna

Sommaire

Mise en situation.....	2
Partie 1 - La chaîne de télescopage	8
Partie 2 - L'équilibrage de la grue	12
Partie 3 - L'assistance de travelling	18
Partie 4 - La structure mécanique du bras de télescopage.....	23
Partie 5 - Synthèse	27
Les annexes	28
Notations utilisées et glossaire	42

Mise en situation

0.1 Les mouvements caméra

La mise en scène d'un film est certainement la partie la plus décisive de sa réalisation. C'est elle qui détermine l'ambiance générale, la continuité et la variété des plans.

Citons trois éléments importants :

- l'échelle des plans (gros plan, plan rapproché ou plan d'ensemble ...) ;
- les axes de visée (plan en plongée, la caméra est située au-dessus du personnage - plan en contre-plongée, la caméra est située au-dessous du personnage) ;
- les mouvements de la caméra.

Les mouvements caméra

Les déplacements de la caméra sont divisés en deux groupes principaux :

- le panoramique, mouvement effectué par une caméra qui, sans bouger de place, pivote horizontalement vers la droite ou la gauche, ou verticalement vers le haut ou le bas ;
- le travelling caractérisé par un déplacement du support de la caméra, en avant, en arrière ou latéralement.

Ce dernier mouvement est réalisé grâce :



- au déplacement du caméraman portant la caméra ;
- au déplacement d'un chariot sur un rail (droit ou courbe) sur lequel est fixée la caméra (**Figure 1**) ;
- au mouvement d'une grue qui porte la caméra.

Il est possible de combiner les deux mouvements.

Figure 1 - Travelling obtenu par translation sur un rail

Ce sujet s'intéresse à une **grue** de prise de vues à laquelle est fixée la caméra, munie d'un système de contrôle à distance : la **Louma2**.

Ce dispositif a été mis au point par deux Français, Jean-Marie Lavalou et Alain Masseron, d'où le nom, composé à partir des patronymes Lava**LOU** et MA**SS**eron.



La Louma fut la première grue permettant de télécommander la caméra. Connue dans le monde entier, la Louma a obtenu un **Oscar technique en 2005**.

La **Louma2**, deuxième génération de la Louma, est une grue de haute performance utilisée pour les tournages de productions à très gros budgets depuis 2007.

Figure 2 - Sur le tournage de « Sex & the city 2 » dans le désert Marocain

Six exemplaires sont disponibles à la location à travers le monde (Paris, Londres, New York, Los Angeles, Vancouver, Sidney).

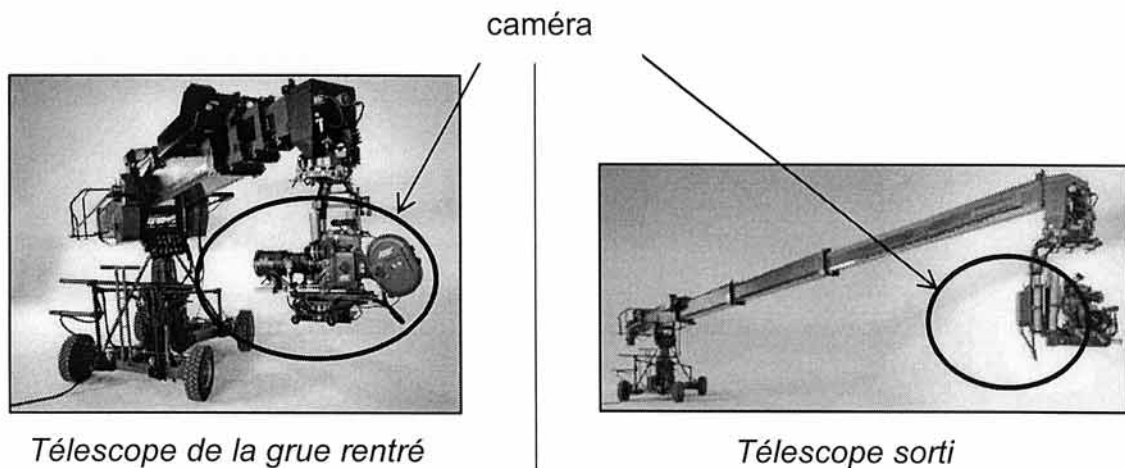


Figure 3 - Vues de la grue télescopique Louma2

Munie d'un bras rigide modulaire, de 2,40 m à 9,75 mètres de long à partir du point de pivot, la Louma2 permet des mouvements de caméra très variés.

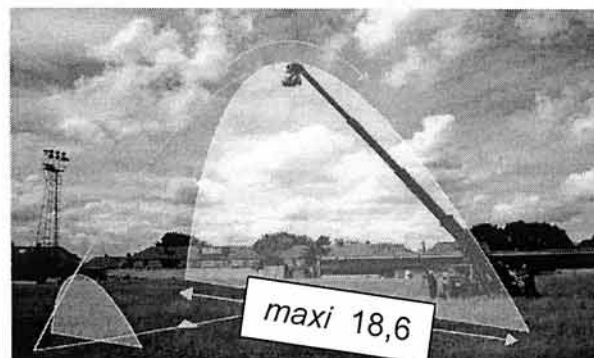


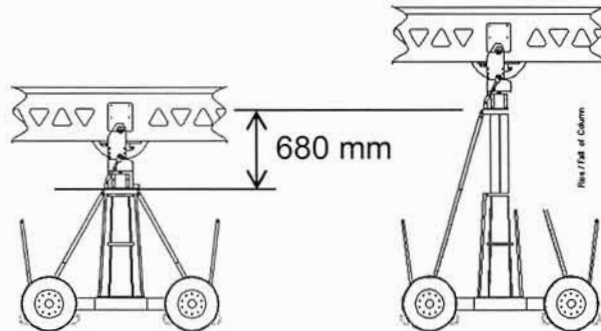
Figure 4 - Visualisation de la zone couverte par le déploiement de la grue

0.2 Les chaines fonctionnelles de la grue télescopique

Il faut bien différencier la **grue télescopique** de la **tête caméra**.

La grue télescopique est composée d'un réglage d'élévation verticale et de trois chaines fonctionnelles (**annexe 1**) :

- l'élévation verticale (colonne télescopique, réglé avant la prise de vues) ;



- le mouvement de « pan » de la grue (rotation autour d'un axe vertical) ;
- le mouvement de « tilt » de la grue (inclinaison) ;
- le télescopage.

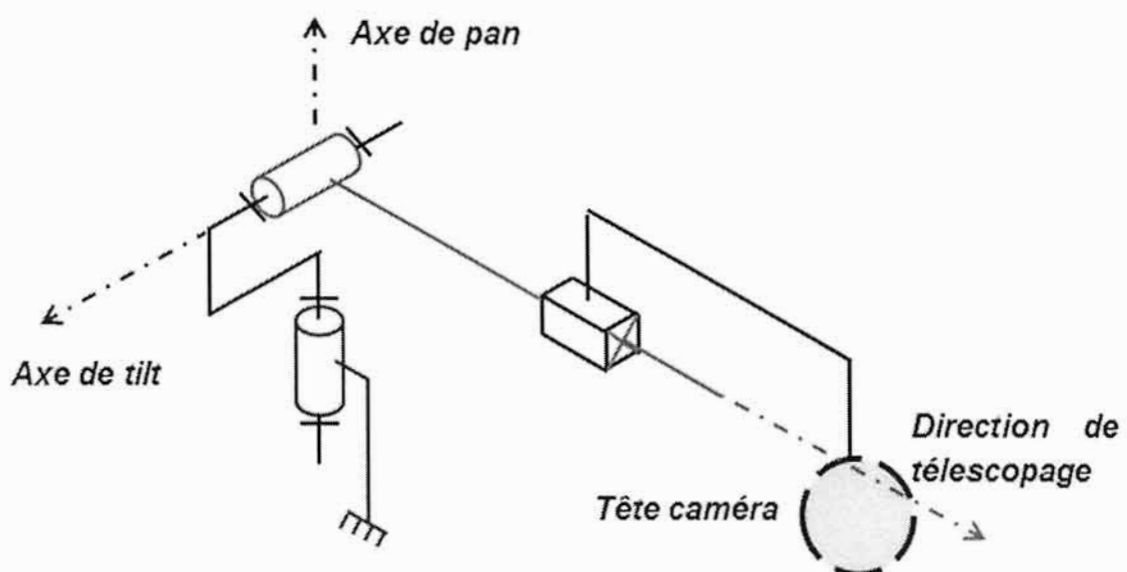
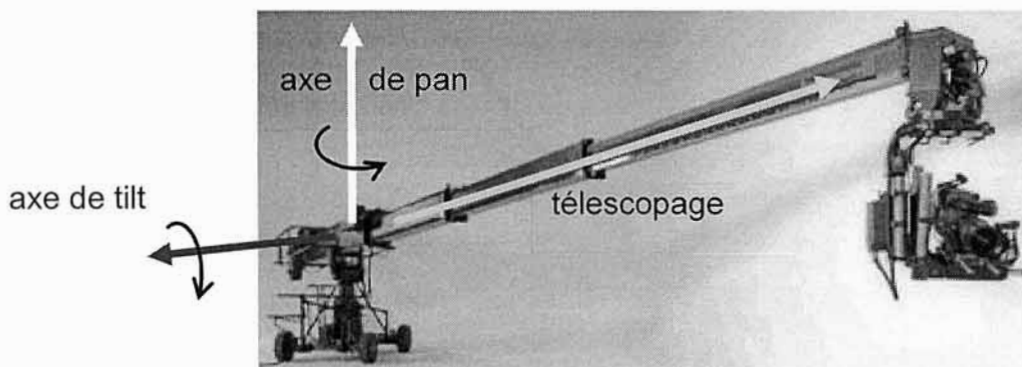


Figure 5 - Schéma cinématique de la grue télescopique

La tête Louma 3D (avec tête caméra au-dessous ou au-dessus du bras).

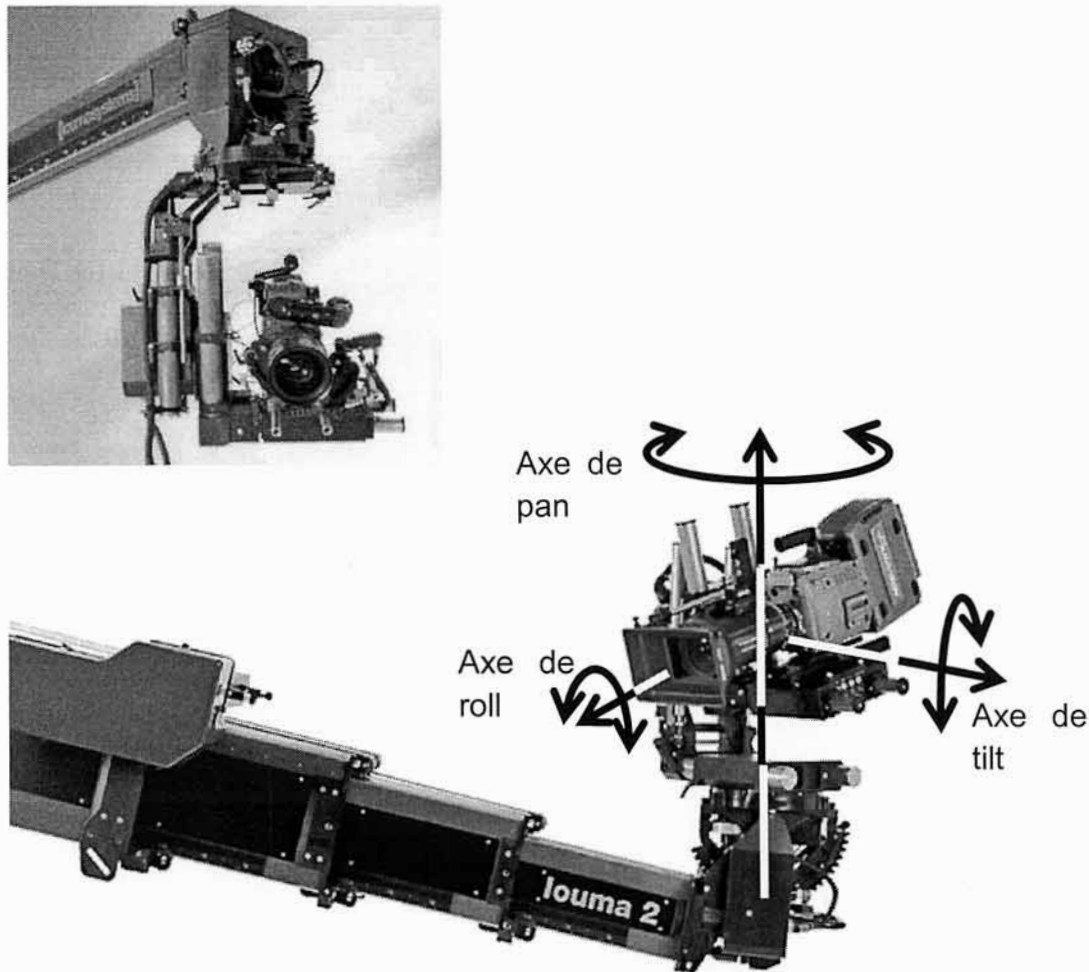


Figure 6 - La tête Louma 3D

0.3 Mise en mouvement de la caméra pendant un tournage

L'environnement de la grue Louma2 est décrit **annexe 2**.

Plusieurs techniciens sont nécessaires pour commander et animer la grue et la tête caméra :

- les machinistes grue
 - un machiniste télescopage qui à l'aide d'un joystick ou manuellement met en mouvement la grue télescopique ;
 - un machiniste orientation, qui manuellement, oriente suivant les axes de pan et de tilt la grue ;

- un caméraman, qui depuis la régie oriente la tête caméra.

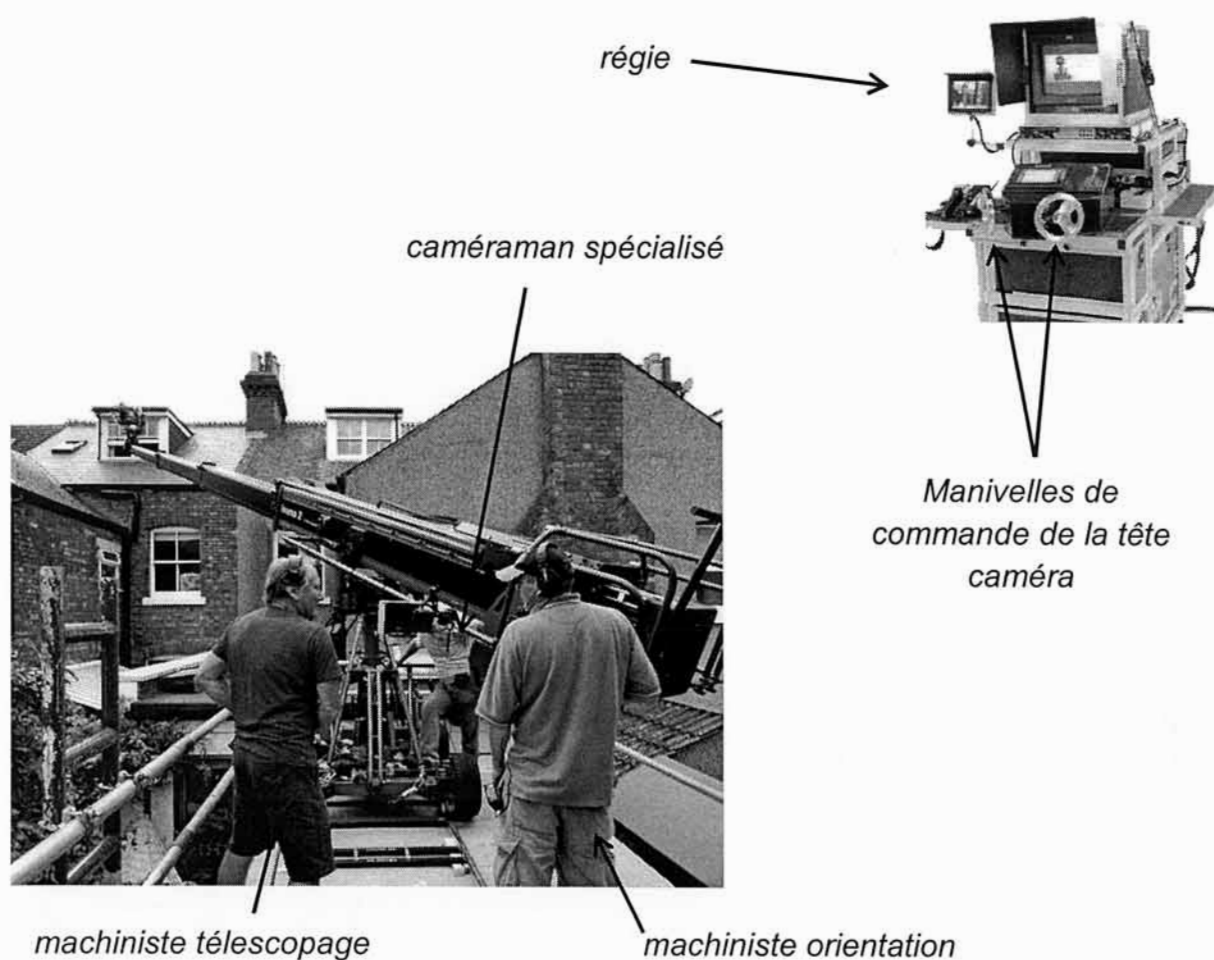


Figure 7 - Les machinistes

Les axes de la grue de pan et de tilt sont manuels, tous les autres sont motorisés (celui de télescopage peut être débrayé afin d'être actionné manuellement).

L'atout principal de la Louma2 réside dans son **assistance informatique**. En effet, son logiciel spécifique permet aux différents axes de la grue (Pan et Tilt de la grue, Pan, Tilt et Roll de la tête, télescope, etc.) de communiquer entre eux afin de permettre leur coordination. Cette évolution permet de se diriger de plus en plus vers des dispositifs numériques d'assistance au cadrage.

Ainsi il est possible de programmer, enregistrer, répéter des mouvements, l'assistance informatique se chargeant de mettre en mouvement tous les axes motorisés. Toutes ces **corrélations d'axes** sont transparentes pour le cadreur qui conserve toute liberté de composer son cadre « par-dessus » la correction automatique. D'autres corrélations sont prévues comme celles qui connecteront télescope et mise au point, ou télescope et zoom.

Ainsi, la Louma2 est une machine vivante, en perpétuelle évolution (**annexe 3**). Grâce à **l'architecture ouverte de son logiciel**, elle évolue au gré des demandes des directeurs de la photo, cadres ou réalisateurs.

Il s'agit bien d'**assistance par ordinateur** et non pas de « motion control », le but étant de permettre la réalisation de nouveaux plans ou de gagner du temps lors de l'exécution de plans réputés difficiles, le tout avec des acteurs, donc en temps réel et en s'adaptant aux imperfections humaines (changements de rythme, de positions ...).

0.4 Objectifs de l'étude

L'évolution du produit depuis la Louma première génération est décrite **annexe 3** et le cahier des charges initial de la Louma2 est en partie fourni **annexe 4**.

La société développant la Louma2 souhaite à présent, grâce aux possibilités offertes par l'assistance informatique réaliser des travellings totalement automatisés.

L'objectif de cette étude est de valider la possibilité de développer cette amélioration permettant ce mouvement assisté.

Pour cela, dans une **première partie**, les performances de la motorisation de la chaîne de télescopage choisie par le concepteur seront validées, afin ensuite d'en déduire les performances cinématiques offertes pour le mouvement de travelling.

Le mouvement de travelling est généré par une orientation (pan ou tilt) de la grue de la part du machiniste. La grue pesant plus d'une tonne, il est essentiel qu'elle soit équilibrée. Dans une **deuxième partie** la solution d'équilibrage retenue par le concepteur sera validée.

Dans une **troisième partie** la commande et les relations entre les axes à implanter dans le logiciel d'assistance qui gèrera le travelling seront définis, ainsi que les performances permises par la grue lors d'un travelling.

Enfin dans une **quatrième partie** les défauts de positionnement de la caméra pendant le travelling seront évalués, les erreurs étant générées d'une part par la dynamique du système, et d'autre part par la flexion du bras au cours du mouvement.

La **dernière partie** permettra de synthétiser l'ensemble des résultats et de conclure sur la faisabilité de réaliser des travellings totalement automatisés respectant les critères imposés du cahier des charges.

Partie 1 - La chaîne de télescopage

Objectif

Le concepteur a dimensionné la chaîne de télescopage suivant les exigences du cahier des charges définies annexe 4.

Le télescopage de 7,35 m doit s'effectuer en moins de 5 s.

Après avoir défini les paramètres d'équilibrage (partie 1.1) et de mouvement (partie 1.2), le choix de la motorisation sera vérifié (partie 1.3).

1.1 L'équilibrage de la flèche

Le bras (flèche) de **la grue est équilibré autour de son point de pivot**, pour rester immobile qu'elle que soit sa position et sans intervention des machinistes. Ce bras équilibré dans toutes ses positions leur permet une grande aisance dans l'exécution des mouvements, et une économie en termes d'effort physique.

Les caractéristiques des éléments mobiles sont données ci-dessous.

Solide	Masse	Longueur
<i>Tronçon fixe</i>	$M_0 = 0,8$ tonne	4 m
<i>Tronçon T_1</i>	$M_1 = 70$ kg	3,88 m
<i>Tronçon T_2</i>	$M_2 = 60$ kg	3,88 m
<i>Tronçon T_3</i>	$M_3 = 50$ kg	3,88 m
<i>Caméra et tête caméra</i>	$M_{cam} = 110$ kg	
<i>Contrepoids</i>	M_{ctp} à déterminer	

Lorsque le bras est complètement sorti, le recouvrement entre chaque tronçon est de 1,20 m et le contrepoids permettant l'équilibre du bras est situé à 2 m en arrière du point de pivot O.

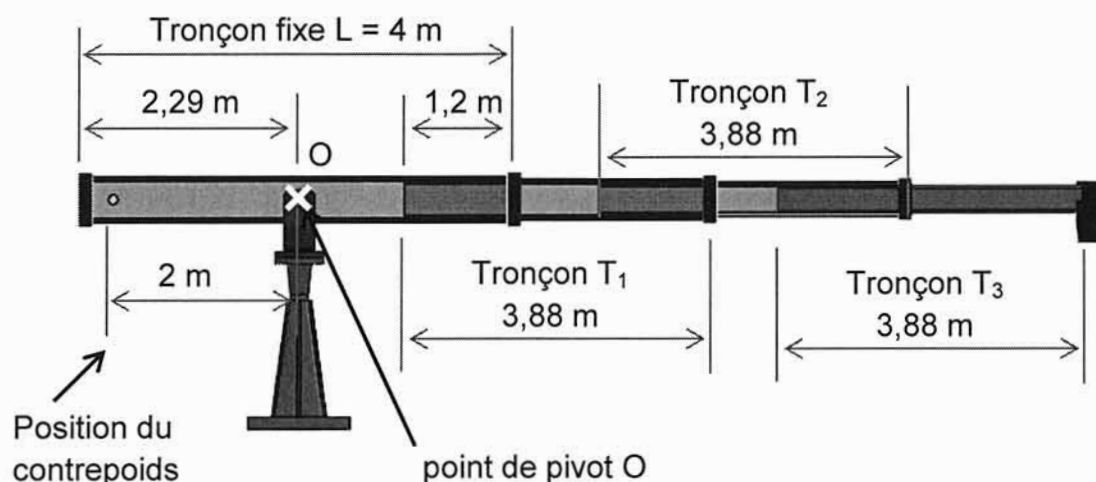


Figure 8 - Dimensions principales, bras sorti

Question 1 Déterminer la valeur de la masse du contrepoids à utiliser.

En position rentrée, chaque tronçon est rentré de 3,6 m dans le précédent (soit un déplacement de 2,4 m par rapport à la position sortie).

Question 2 Déterminer la valeur du déplacement correspondant du contrepoids vers le point de pivot pour maintenir l'équilibre de la flèche.

Justifier le rapport de réduction de 0,78 entre le déplacement du contrepoids et le déplacement du tronçon T_1 .

1.2 Les paramètres du mouvement

La structure de la chaîne d'énergie de télescopage est donnée **annexe 5**. Le schéma de principe de la chaîne de transmission de puissance est fournie **annexe 6**.

Il est possible de réaliser un mouvement de sortie (ou de rentrée) du télescope en 5 s.

Le télescopage possède un débattement de 7,35 m (de 2,40 à 9,75 m). Le mouvement se fait suivant le profil **figure 9**.

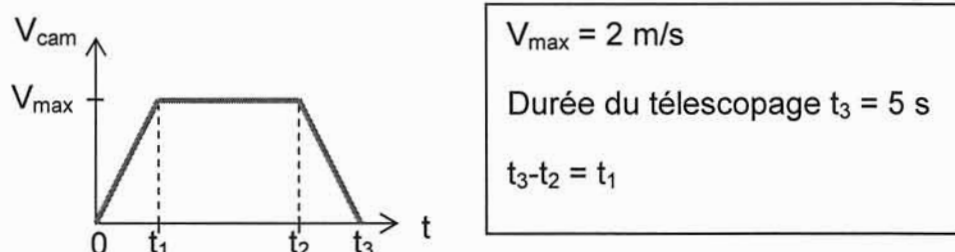


Figure 9 - Profil de vitesse de la caméra lors d'un télescopage complet

Question 3 Déterminer l'expression de l'accélération $a_{\text{caméra}}$ de la caméra pendant la phase d'accélération (entre 0 et t_1). Faire l'application numérique.

1.3 Dimensionnement du moteur de la chaîne d'énergie de télescopage

Le moteur de la chaîne de télescopage met en mouvement (voir schéma de principe **annexe 6**) :

- les trois tronçons, dont au bout du troisième se trouve la caméra ;
- un contrepoids, placé en arrière qui se déplace en sens inverse des tronçons de façon à garantir l'équilibrage statique de la grue à chaque instant.

On nomme :

- V_{cam} la vitesse du centre de la caméra (et du tronçon T_3) par rapport au support de la grue ;
- ω_m la vitesse de rotation de l'arbre moteur ;
- r le rapport de réduction entre le moteur et le tronçon T_3 : $r = \frac{V_{\text{cam}}}{\omega_m}$;
- J_{mot} l'inertie de l'arbre moteur (le moteur retenu par le concepteur est le Parvex RS530E dont la documentation est donnée **annexe 7**).

La chaîne de télescopage est constituée de trois tronçons, chacun des tronçons se déployant à une vitesse $\frac{V}{3}$ relativement au tronçon précédent.

Les caractéristiques des éléments mobiles sont rappelées ci-dessous.

Solide	Masse	Vitesse
Tronçon T_1	$M_1 = 70 \text{ kg}$	$V_{\text{cam}}/3$
Tronçon T_2	$M_2 = 60 \text{ kg}$	$2.V_{\text{cam}}/3$
Tronçon T_3	$M_3 = 50 \text{ kg}$	V_{cam}

Solide	Masse	Vitesse
Caméra et tête caméra	$M_{\text{cam}} = 110 \text{ kg}$	V_{cam}
Contrepoids	$M_{\text{ctp}} = 855 \text{ kg}$	V_{ctp}

On néglige la masse de toutes les autres pièces en mouvement non décrites ci-dessus (pièces constituant les réducteurs ...).

Question 4 Que vaut le rapport de réduction r (application numérique) ? À partir des données de l'**annexe 6**, exprimer V_{ctp} en fonction de ω_m .

Question 5 Exprimer l'énergie cinétique de l'ensemble des pièces en mouvement {arbre moteur, contrepoids, tronçons T_1 , T_2 et T_3 , caméra et tête-caméra}. Exprimer cette énergie cinétique en fonction de ω_m . En déduire J_{eq} l'inertie équivalente ramenée sur l'axe de l'arbre moteur. Faire l'application numérique.

Hypothèses :

- les pertes dans le réducteur roue et vis sans fin sont modélisées par un rendement $\eta = 85 \%$;
- l'ensemble des frottements visqueux est modélisé par un coefficient de frottement visqueux ramené sur l'arbre moteur $f_{\text{eq}} = 0,38 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$;
- on prendra pour la suite $J_{\text{eq}} = 1,62 \cdot 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
- lors de la première phase du mouvement, on prendra comme valeur d'accélération $\alpha_{\text{caméra}} = 1,51 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

On note C_m , le couple fourni par le moteur.

Question 6 Exprimer de manière littérale l'ensemble des puissances galiléennes (extérieures et intérieures) au système.

Question 7 En appliquant le théorème de l'énergie-puissance (aussi appelé théorème de l'énergie cinétique), lors de la phase d'accélération, déterminer l'expression littérale du couple moteur en fonction de $\dot{\omega}_m$, ω_m et des données jugées utiles.

1.4 Conclusion

Question 8 Conclure quant au choix du moteur RS530E.

Partie 2 - L'équilibrage de la grue

2.1 Le premier prototype

L'équilibrage de la Louma2 est un des points forts de la grue :

- les machinistes peuvent lâcher le bras quelle que soit sa position, le système reste toujours en équilibre ;
- les machinistes doivent fournir des efforts modérés pour mettre en mouvement la grue.

Le centre de gravité de la grue est au point de coïncidence des deux axes de panoramique et de tilt.

Lors des essais du premier prototype, les concepteurs se sont aperçus que l'équilibrage statique initial de la grue n'était pas maintenu lors du mouvement de télescopage. Plus le télescope se déployait, plus la caméra descendait (très lentement toutefois) sans action correctrice du technicien.

La cause fut rapidement identifiée. L'ensemble des câbles (alimentation, mesure, ... de la caméra et de la tête caméra) est réuni dans un faisceau à l'intérieur de la grue et enroulé dans la partie arrière.

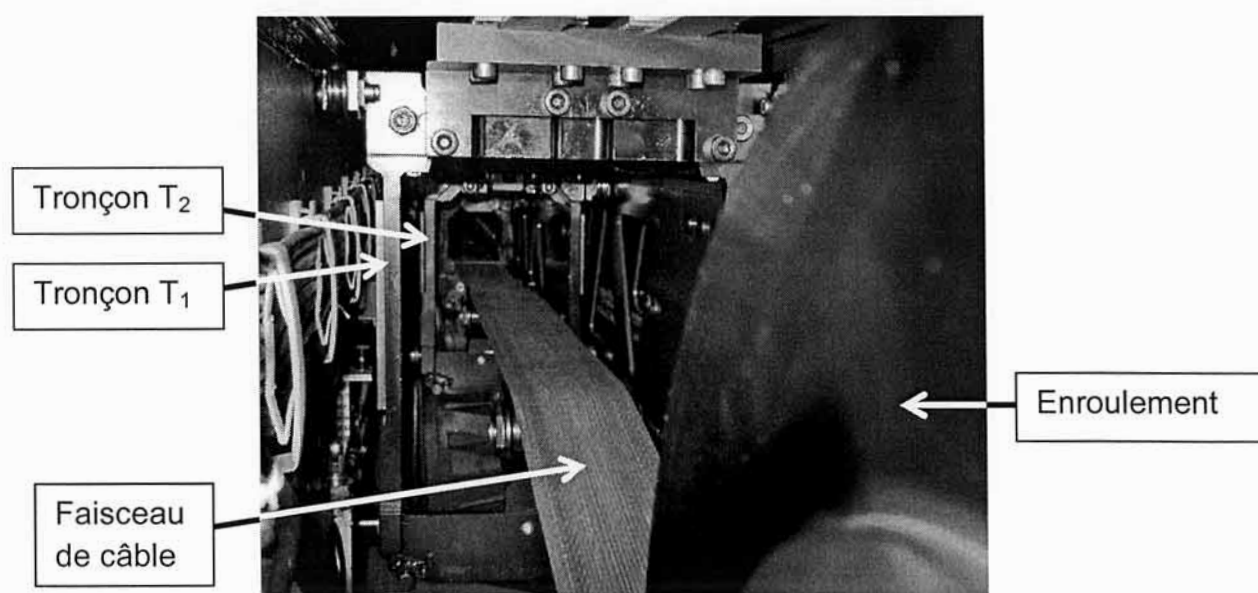


Figure 10 - Vue de l'intérieur de la Louma, tronçons rentrés

Le contrepoids a été dimensionné pour compenser les masses des tronçons et caméra. Une partie de la masse des câbles se déplaçant (voir **figure 11**, page suivante), l'équilibrage statique n'est plus garanti à chaque instant.

Objectif

La partie 2 a pour but de déterminer le déséquilibre engendré par le déport des câbles (2.2) puis de valider la solution du concepteur pour corriger ce défaut (partie 2.3).

2.2 Déséquilibre dû au câble

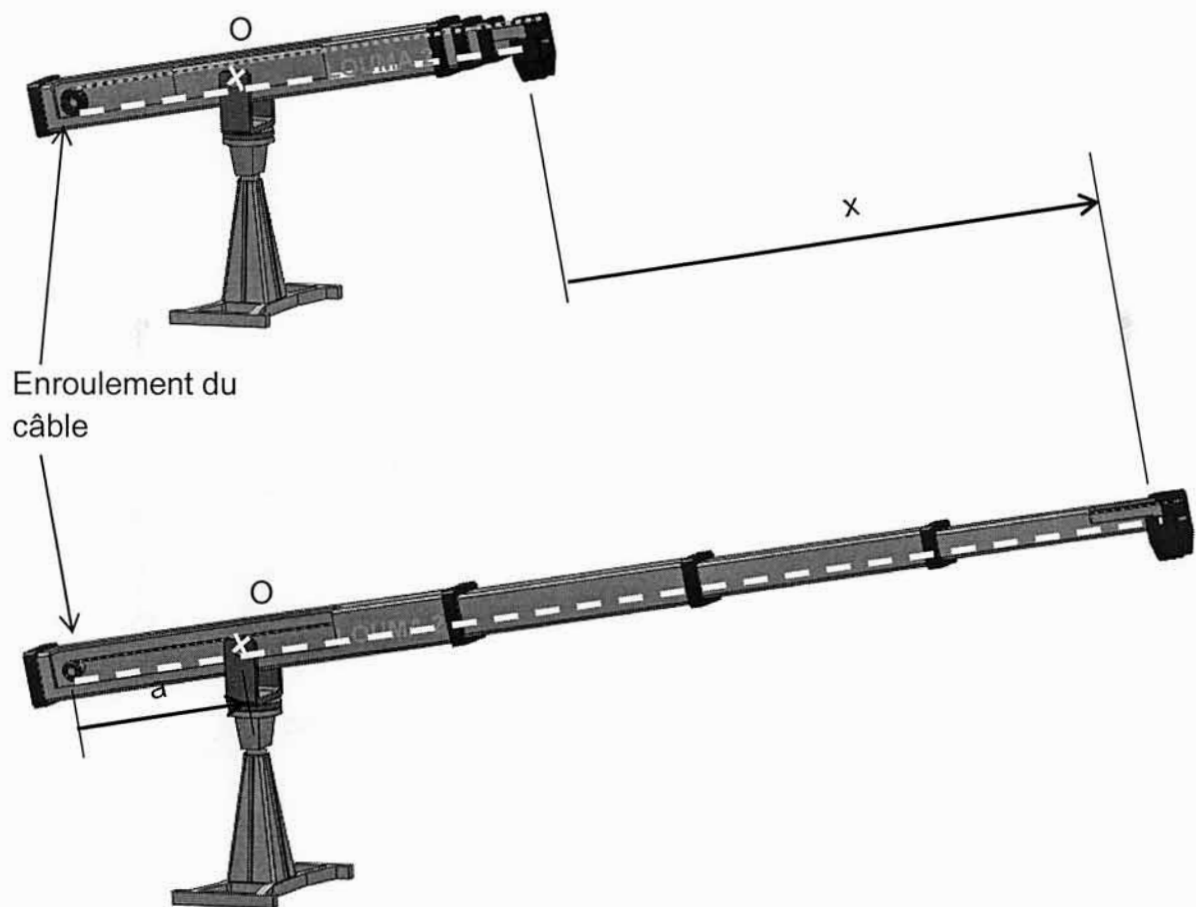


Figure 11 - Visualisation du déroulement du câble alimentant la caméra et la tête caméra

en haut : grue complètement rentrée

en bas : grue sortie (position quelconque)

On note :

- $a = 1,5 \text{ m}$, l'entraxe entre le point fixe O de la gue et l'axe d'enroulement du câble (distance fixe) ;
- x , le déplacement du tronçon 3 (et donc de la tête caméra) ;
- $\mu = 200 \text{ g/m}$ la masse linéique de câble enroulé ;
- G_{cd} le centre de gravité de la partie déroulée du câble (voir **figure 12**) ;
- x_{Gcd} , le déplacement du centre de gravité.

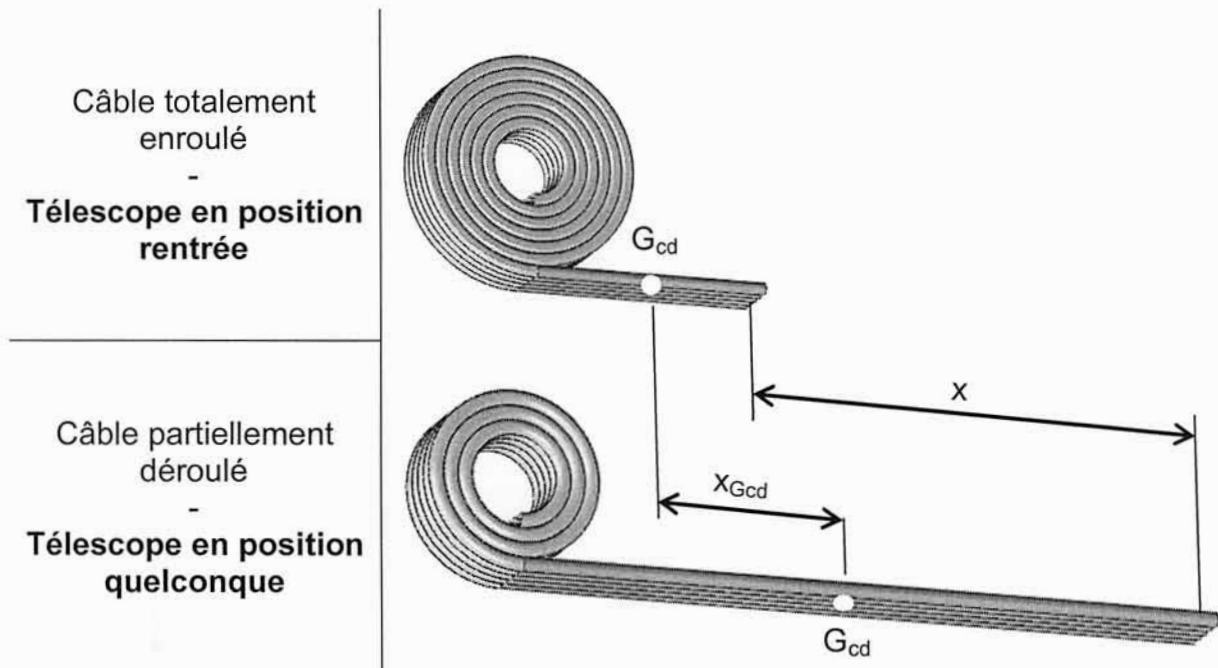


Figure 12 - L'enroulement du câble

*Étude de la partie de câble **enroulé** seulement*

Question 9 Que vaut la différence de masse de câble enroulé, entre les deux configurations ?

*Étude de la partie de câble **déroulé** seulement*

Question 10 En fonction du déplacement du tronçon 3 (valeur x), donner la variation correspondante de la masse du câble déroulé.

Question 11 Le tronçon T_3 s'est déplacé d'une valeur x , de quelle distance s'est déplacé le centre de gravité G_{cd} ?

Si le câble ne se déroulait pas, le point O de pivot resterait à chaque instant le centre de gravité de la grue, l'équilibrage statique serait donc réalisé. On aurait donc :

$$\sum M_i \overrightarrow{OG_i} = \vec{0}$$

Question 12 À cause du déplacement du câble, que vaut $\sum M_i \overrightarrow{OG_i}$?

Ce déséquilibre est une fonction quadratique du déplacement des tronçons. Il n'est pas possible en modifiant seulement la masse ou la position initiale du contrepoids de le compenser.

Il a donc été choisi d'ajouter une mobilité au contrepoids en intercalant un support entre celui-ci et le tronçon fixe. Ainsi, le déplacement de l'ensemble (support plus contrepoids) est conservé à la vitesse de $0,78V_{cam}$ et s'y ajoute une nouvelle translation du contrepoids permettant de corriger le déséquilibre engendré par le câble.

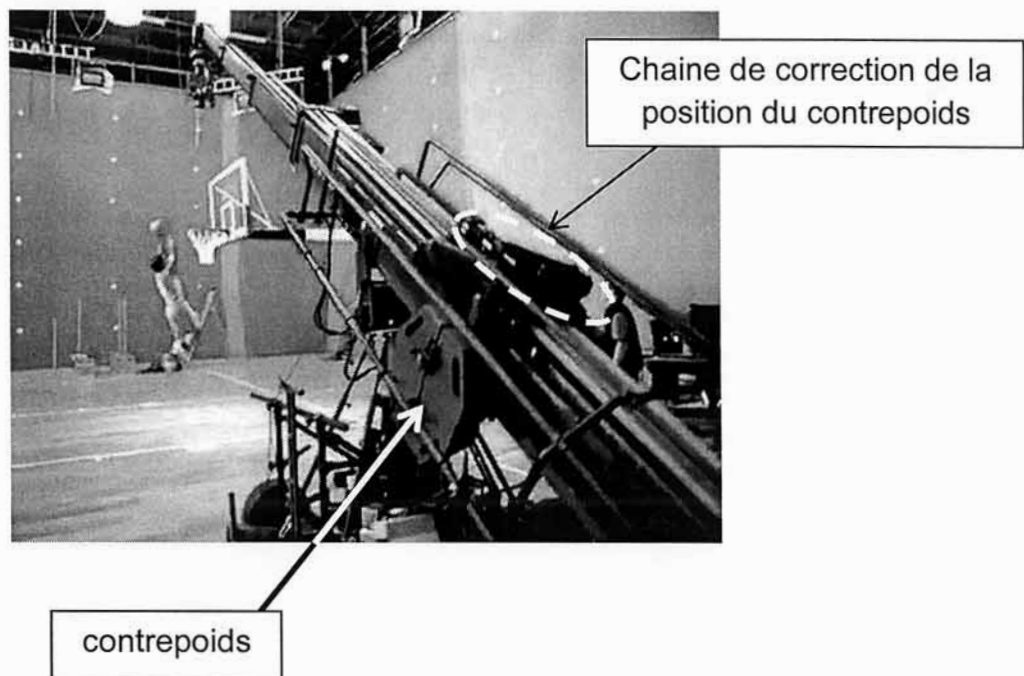


Figure 13 - La chaîne de correction de la position du contrepoids

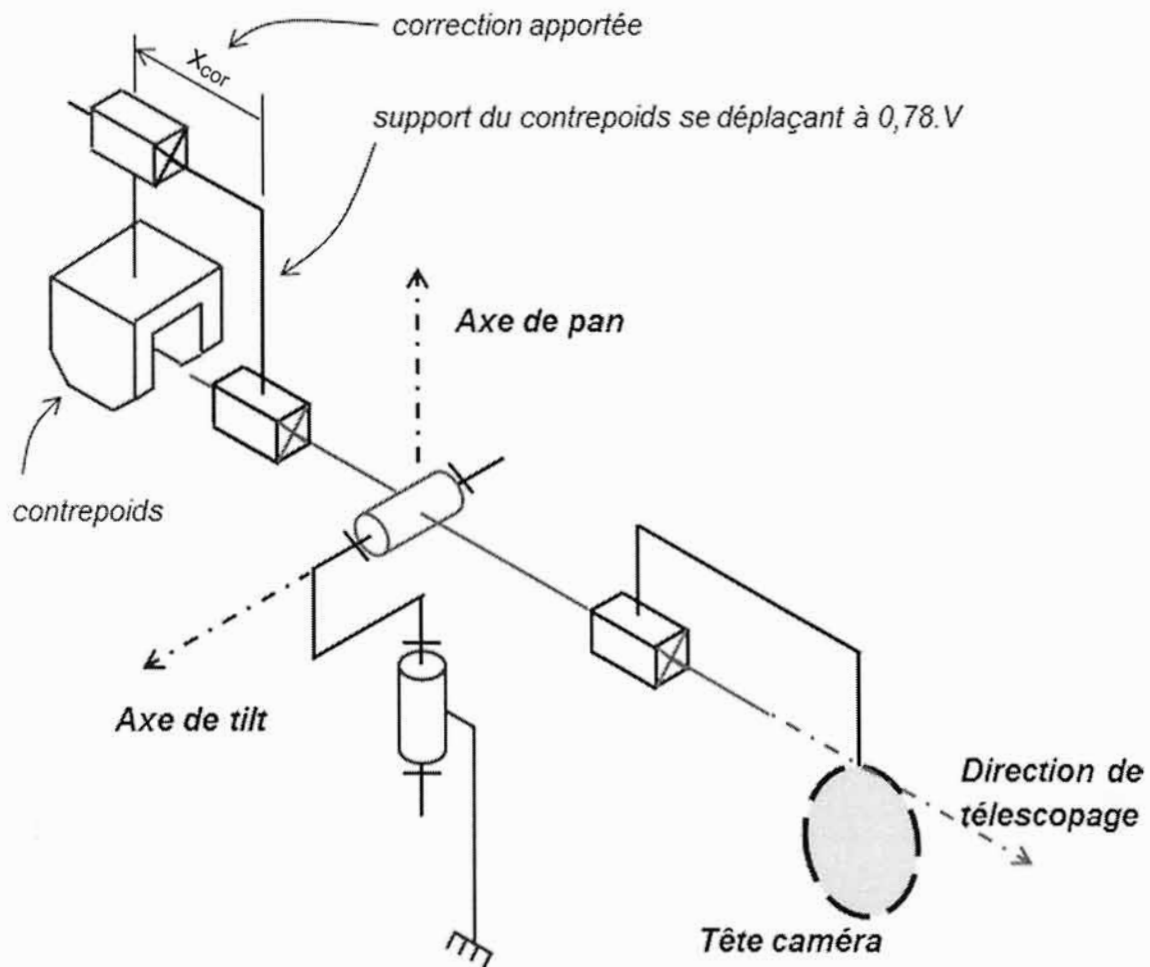


Figure 14 - Schéma de principe de la chaîne de correction de la position du contrepoids

Question 13 Le contrepoids ayant une masse M_{ctp} , que vaut le déplacement x_{cor} , du contrepoids par rapport à la structure mobile (correction de la position du contrepoids), en fonction de x , le déplacement du tronçon 3 (sous forme littérale). Quelle sera alors la correction maximale à apporter sur la position du contrepoids ? Faire l'application numérique.

2.3 La chaîne de correction de la position du contrepoids

Le schéma bloc de l'asservissement de la position du contrepoids est donné **figure 15**.

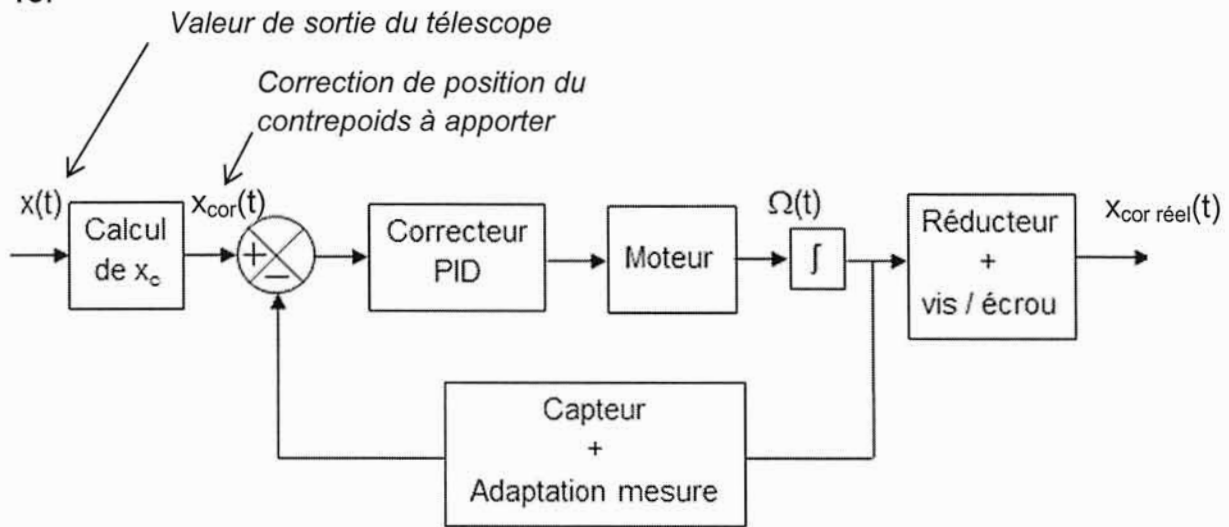


Figure 15 - Contrôle de la position du contrepoids

Notations :

- $x_{cor}(t)$, consigne de position du contrepoids ;
- $x_{cor\text{ réel}}(t)$, position réelle du contrepoids ;
- $x(t)$, position réelle du tronçon 3.

Le concepteur a choisi d'utiliser le codeur monté sur l'arbre moteur de la chaîne de télescopage (PARVEX C6B-5000) et d'en déduire la position des tronçons. Ce codeur envoie 5000 impulsions par tour.

Question 14 Quelle est la résolution du codeur ?

En déduire la résolution de la mesure.

En déduire le défaut maximal de positionnement du contrepoids.

Les frottements secs dans l'articulation de tilt ont été mesurés dans différentes configurations. La valeur moyenne du couple résistant en décollant est de 0,05 N·m.

Question 15 La correction apportée permettra-t-elle, quelle que soit la position du bras, de garantir son équilibre sans l'action du machiniste ?

Partie 3 - L'assistance de travelling

3.1 Le système Backpan

L'innovation technologique majeure de la Louma 2 est la mise en réseau de tous les axes. L'une des premières applications de cette communication inter axes est la compensation de « Back Pan » très appréciée des cadreurs.

Tout débattement horizontal d'un bras de grue a pour effet de modifier la direction de visée. Ce changement de direction est en général perturbateur pour le cadreur, ce qui l'oblige à compenser par un panoramique effectué en sens contraire. Cette compensation est particulièrement ardue dans le cas des grues télécommandées, car le cadreur ne ressent pas lui-même ce débattement (il n'est pas physiquement porté par la grue). Et si cette compensation n'est pas exacte, il se crée un effet visuel de « godille » préjudiciable à la qualité du mouvement.

Le système Backpan permet d'effectuer cette compensation automatiquement **grâce à l'implantation d'un capteur de position sur l'axe de panoramique horizontal du bras**. Ce capteur transmet une information qui est traitée, puis transmise au moteur « Pan » de la tête caméra. Cette correction automatique permet qu'à tout changement d'angle du bras de grue **corresponde un angle identique mais de sens contraire de la tête caméra**. La correction induite est totalement « transparente » pour le cadreur, qui conserve l'entière liberté de composer son cadre comme il l'entend « par-dessus » la correction du Backpan. Ce système facilite également les débuts et les fins de mouvement en assurant un synchronisme parfait entre le machiniste et le cadreur.

La correction de BackPan a fait l'objet de dépose d'un brevet.

Question 16 À quoi sert ce brevet ? Combien de temps sera-t-il valable ?

3.2 Le système de compensation de « Planning »

Le système « Backpan » ne permet pas à lui seul de réaliser des travellings entièrement assistés. Les compléments au cahier des charges (**annexe 8**) précisent les exigences à respecter.

En effet, la longueur de télescopage doit être adaptée tout au long du mouvement de travelling (voir **annexes 9 et 10**). Le système permettant d'adapter la longueur du télescope lors d'un travelling s'appelle le système de compensation de planning.

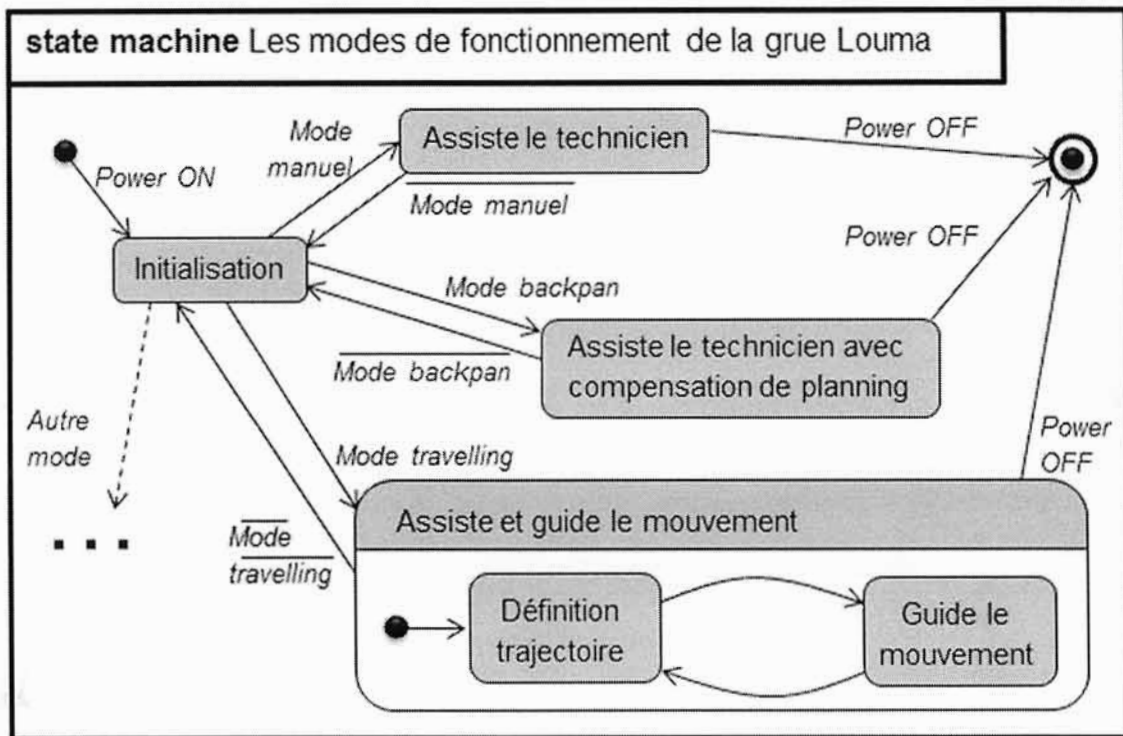


Figure 16 - Diagramme d'états de la Louma2

Objectif

L'objectif de la partie 3 est de vérifier que la chaîne d'énergie de télescopage est correctement dimensionnée pour accepter l'évolution de compensation de « planning », et ensuite de définir la loi de commande à implanter pour ce mode de compensation de planning afin de garantir la fluidité des prises de vues.

On rappelle que la longueur du bras de la Louma 2 peut varier de 2,40 à 9,75 m.

Question 17 D'après les caractéristiques de télescopage de la Louma 2, est-il possible de réaliser un travelling de 17 m ? Dessiner si nécessaire un croquis pour expliquer les calculs.

3.3 Validation des performances de la chaîne de télescopage

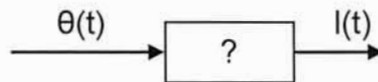
L'**annexe 10** fournit le paramétrage de la grue.

La base $(\vec{x}_{10}, \vec{y}_{10}, \vec{z}_1)$ est la base de référence liée au bras dans sa position initiale. Le vecteur $\vec{x}_{10}$ indique la direction initiale du bras.

La base $(\vec{x}_1(t), \vec{y}_1(t), \vec{z}_1)$ suit le bras télescopique dans son mouvement.

On note $l(t)$ la longueur du bras (distance entre O et A_t). À l'instant initial la longueur est notée l_0 .

Pour chaque position du point $A(t)$, il est possible d'exprimer l'angle de pan $\theta(t)$ dont a tourné le bras et la longueur du bras télescopique.



Question 18 À partir du paramétrage de la **figure B** de l'**annexe 10**, en effectuant une fermeture géométrique, exprimer $l(t)$ en fonction de l_0 , α et $\theta(t)$ puis en fonction de $d(t)$, α et l_0 .

Question 19 Que vaut la vitesse V_{cam} de rentrée ou sortie du bras télescopique en fonction des paramètres $d(t)$, $d'(t)$, l_0 et α ?

On se place dans la situation où la longueur de travelling est maximale : $d_{finale} = 18,9$ m. Dans ce cas, $\alpha = 165^\circ$, $l_0 = 9,75$ m.

On donne **annexe 11** l'évolution de $V_{cam}(t)$ la vitesse de rentrée / sortie du bras (plus exactement du tronçon 3) en fonction du temps et l'accélération, pour un travelling à vitesse constante ($d''(t)$ est nulle).

Question 20 D'après les courbes **annexe 11**, déterminer approximativement le temps nécessaire pour effectuer un travelling, à partir des performances de la chaîne de télescopage définies partie 1 et des caractéristiques moteur **annexe 7**.

Question 21 Les performances du moteur actuel sont-elles suffisantes pour permettre au système de compensation de planning de suivre une personne se déplaçant en marchant (environ 4 km/h) ?

3.4 La loi de commande de compensation de travelling

Pour chaque position angulaire $\theta(t)$ (angle de pan) imposée par le machiniste, l'assistance informatique doit piloter le bras télescopique afin qu'il soit sorti de la bonne valeur.

Le schéma-bloc de la **figure 17** présente la structure du système d'assistance au travelling. Cette commande est constituée d'un asservissement en position et de vitesse.

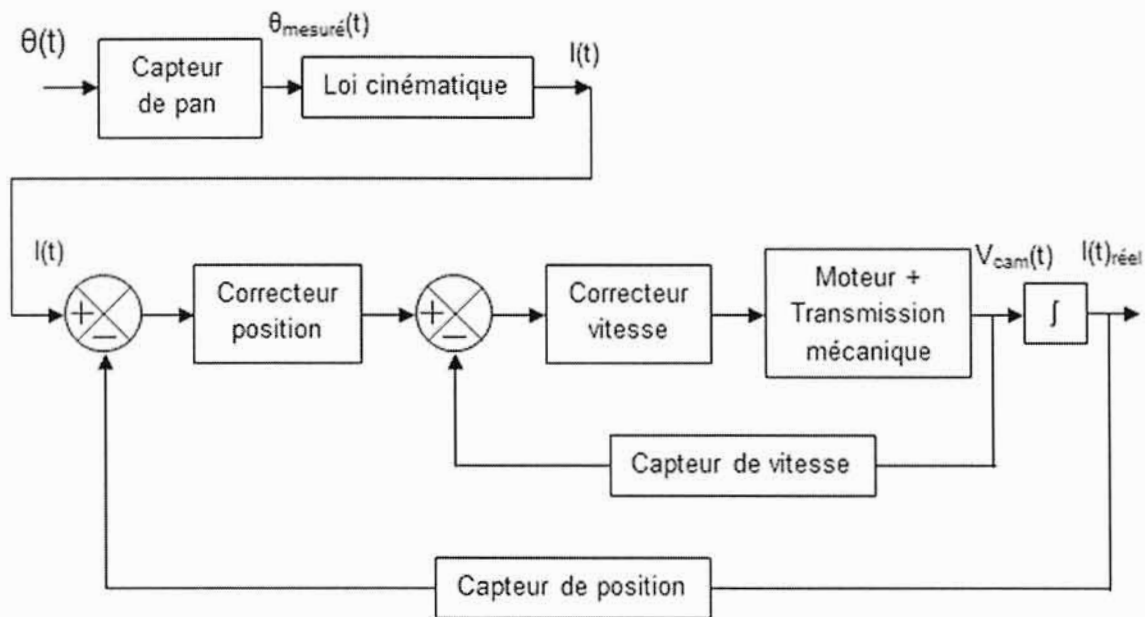


Figure 17 - Schéma bloc du système d'assistance au travelling

Lors d'un travelling à vitesse constante (suivi d'une personne marchant par exemple) la longueur du télescope doit évoluer suivant le graphique de la **figure 18**.

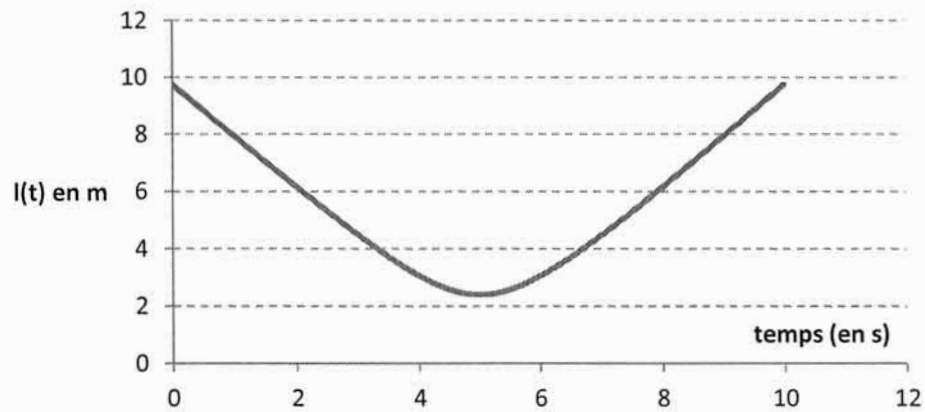


Figure 18 - Longueur du bras télescopique lors d'un travelling de 10 s.

Une modélisation informatique a permis de simuler le comportement en travelling de la grue. Trois réglages de correcteur (donnant chacun plus ou moins d'importance à chaque critère) ont été appliqués et conduisent aux résultats de la **figure 19**. Cette figure représente l'écart entre la position réelle de la tête caméra et la position souhaitée (c'est-à-dire l'écart à la trajectoire parfaite).

Écart à la trajectoire (en mm)

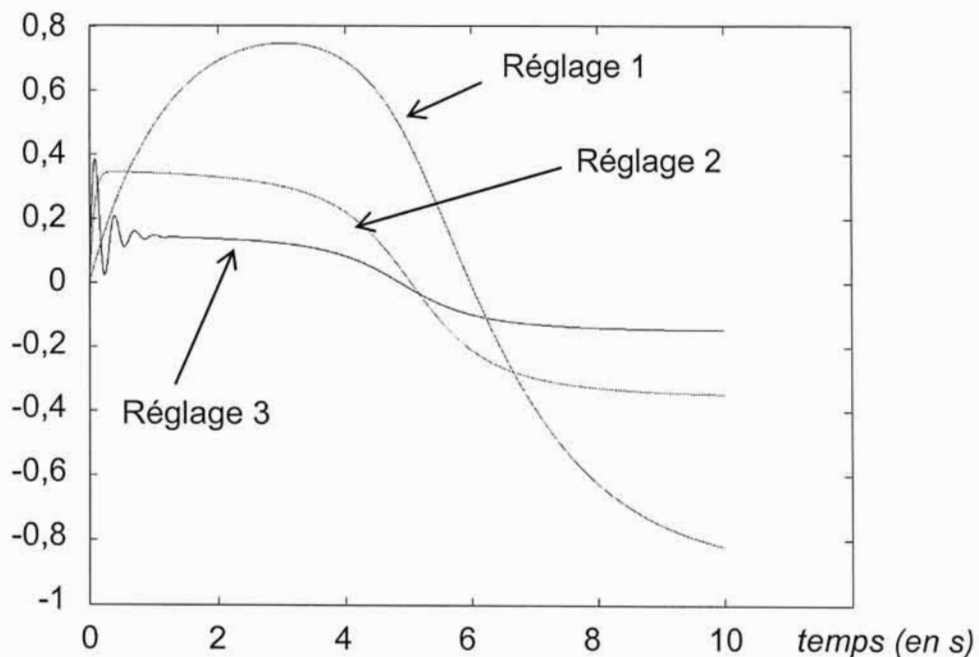


Figure 19 - Écart de position de la caméra par rapport à la trajectoire de travelling désirée

Question 22 Quelle est la courbe du comportement le plus adéquat pour le mouvement de travelling ?

En utilisant les courbes de la **figure 19**, conclure sur la capacité de la grue et de son assistance informatique à réaliser un travelling assisté à partir des exigences définies dans le cahier des charges **annexe 8**.

Partie 4 - La structure mécanique du bras de télescope

Objectif

Du fait des actions extérieures (pesanteur principalement) le bras télescopique se déforme. Lors du travelling, la longueur du bras varie. Il est indispensable que la caméra reste dans un plan horizontal.

L'objectif des questions suivantes est de vérifier que la déformation du bras reste négligeable et ne sera pas nuisible à la fluidité des images en tenant compte de critères techniques, environnementaux et économiques.

4.1 Rigidité des tronçons

On considère que le bras n'est soumis qu'à son propre poids et supporte la caméra (de masse 110 kg) en bout :

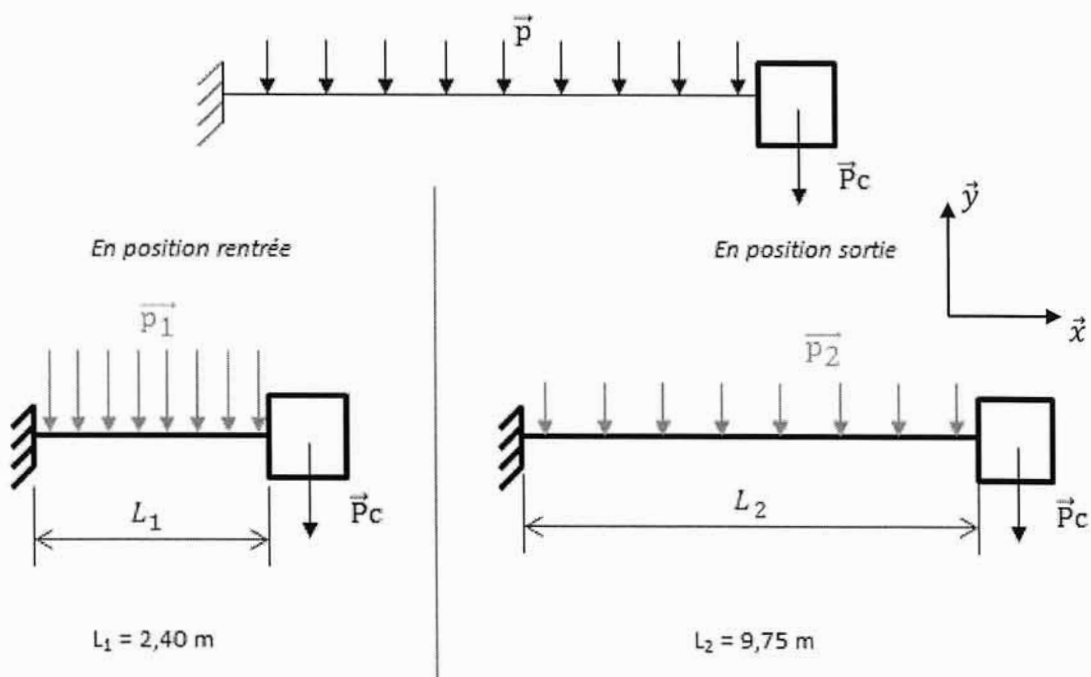


Figure 20 - Modélisation du bras pour l'étude de flexion

Hypothèses :

- on considère le bras comme étant monobloc, de géométrie constante ;
- le poids de la grue est reparti de façon homogène sur toute la longueur.

On note :

- $\vec{p} = -p \vec{y}$ est la densité linéique du poids du bras ($p = p_1$ en position rentrée, $p = p_2$ en position sortie) ;
- $\vec{P}_c$, le poids de la caméra ;
- E , le module d'Young du matériau du bras ;
- $G(x)$ est le centre d'une section droite d'abscisse x ;
- I_{Gz} , le moment quadratique par rapport à (G, z) ($I_{Gz} = I_{Gz1}$ en position rentrée, $I_{Gz} = I_{Gz2}$ en position sortie) ;
- L la longueur de la poutre (L_1 en position rentrée, L_2 en position sortie) ;
- S est la valeur de la section droite de centre $G(x)$;
- M la masse totale du bras.

Question 23 Donner l'expression de p en fonction de M et de toutes variables jugées utiles.

Question 24 Montrer que le torseur des efforts intérieurs vaut :

$$\{\tau_{coh}\} = \left\{ \begin{array}{l} -p(L-x)\vec{y} - P_c \vec{y} \\ -p \frac{(L-x)^2}{2} \vec{z} - P_c (L-x) \vec{z} \end{array} \right\}$$

Question 25 En utilisant le modèle d'Euler-Bernoulli et en notant $v(x)$ le déplacement du centre d'une section droite $G(x)$ suivant $\vec{y}$, montrer que la flèche en bout de bras vaut :

$$v(L) = -\frac{pL^4}{8EI_{Gz}} - \frac{P_c L^3}{6EI_{Gz}}$$

Question 26 La formule ci-dessus permet de calculer la flèche en bout du bras. Peut-on agir sur tous les paramètres, et de quelle façon, de manière à minimiser la flèche en bout de grue ?

Les critères retenus pour le choix du couple matériau/procédé des tronçons du télescope sont (par ordre décroissant d'importance) :

- une masse minimale permettant une flèche inférieure au millimètre (1) ;
- un prix minimal (2) ;
- un impact environnemental minimal (3).

Question 27 Déterminer le matériau répondant au mieux aux critères ci-dessus. Pour cela, construire une matrice de décision telle que celle esquissée ci-après :

- ligne 1. À partir de l'**annexe 12**, classer les matériaux portés sur le graphe en fonction du critère (1). Mettre 1 pour celui le plus approprié, 2 pour le suivant, ... (expliquer comment obtenir ce classement) ;
- ligne 2. À partir de l'**annexe 13**, classer les matériaux en fonction du critère (2) ;
- ligne 3. À partir de l'**annexe 14**, classer les matériaux en fonction du critère (3).

Critère	Coefficient	Matériau 1		Matériau 2		...
		rang	calcul	rang	calcul	
masse minimale (1)	3	3	9 (=3x3)	1	3 (=3x1)	
...	2	...				
...	...					
Total			somme		somme	



Figure 21 - Photo du tronçon n°3

Question 28 Le constructeur a porté son choix sur un alliage d'aluminium. Sachant que $p_1 = 180 \text{ N/m}$ et en prenant $I_{GZ} = 1,71 \cdot 10^{11} \text{ mm}^4$, calculer la flèche au niveau de la caméra en position bras sorti.

Conclure quant au respect du cahier des charges.

4.2 Guidage des tronçons

Il est essentiel pour garantir la fluidité des prises de vue que les guidages en translation entre les tronçons ne génèrent pas de défauts.

Entre chaque tronçon le guidage est réalisé :

- à l'arrière, par 4 galets guidés sur des rails d'angle ;
- à l'avant, par 4 galets montés sur supports.

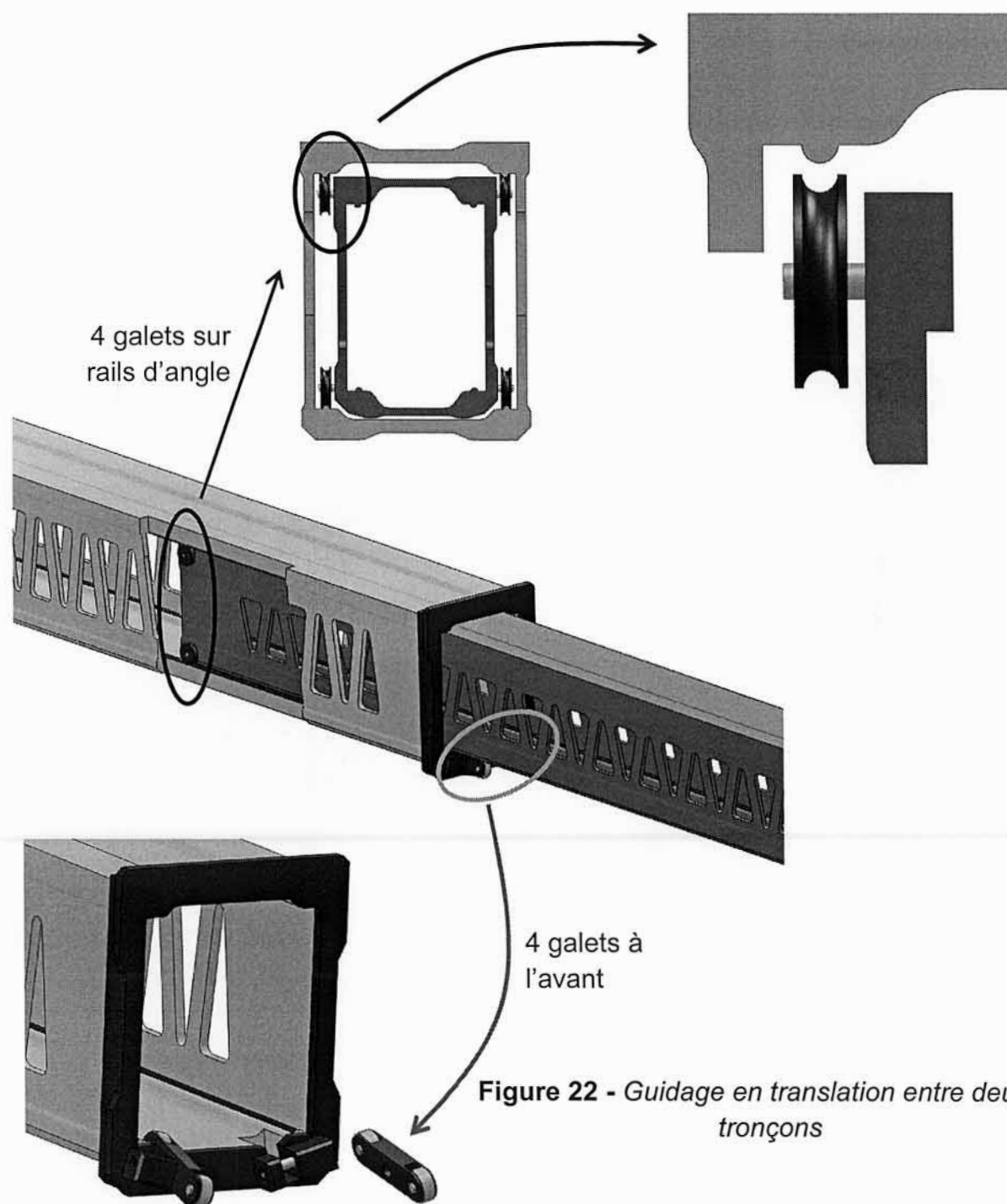
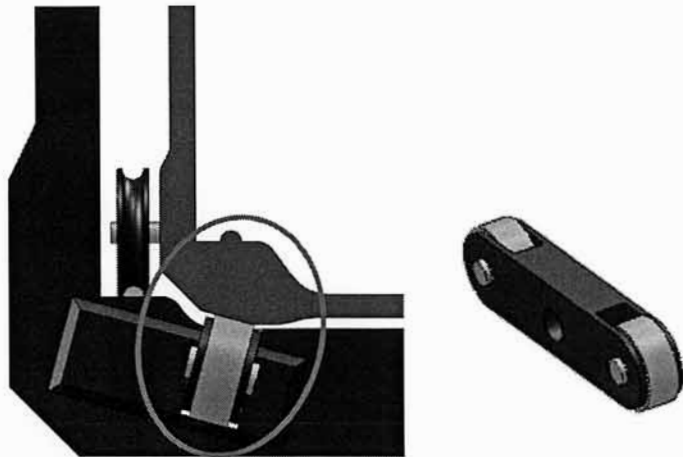


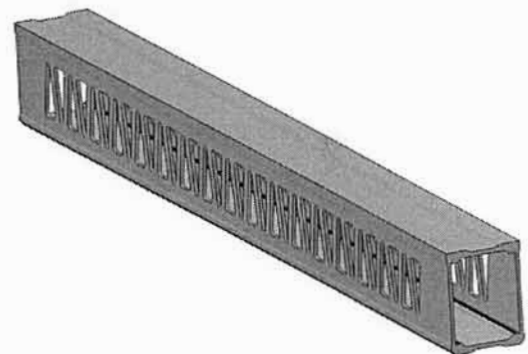
Figure 22 - Guidage en translation entre deux tronçons

Question 29 Déterminer la liaison équivalente entre le tronçon intérieur et le tronçon extérieur réalisée par deux galets montés sur un support (partie entourée ci-contre).



Question 30 Déterminer le degré d'hyperstatisme du guidage en translation du tronçon intérieur par rapport au tronçon extérieur (on modélisera le contact d'un galet sur un rail par une liaison sphère/cylindre).
Conclure quant à la problématique.
Quelles conditions géométriques faut-il imposer pour garantir le bon fonctionnement ?

Question 31 D'après les photos et images ci-dessus, proposer une méthode d'obtention d'un tronçon.



Partie 5 - Synthèse

Objectif

Les précédentes parties ont permis de mettre en évidence diverses valeurs recherchées.

L'objectif de cette dernière partie est de synthétiser l'ensemble des réponses et de conclure sur la faisabilité de la mise en œuvre de travellings totalement automatisés.

Question 32 Présenter sous forme de tableau les valeurs obtenues aux questions 8, 15, 21 et 28 puis les mettre en regard les valeurs attendues du cahier des charges (CdC).
Conclure quant à l'objectif général rappelé ci-dessus.

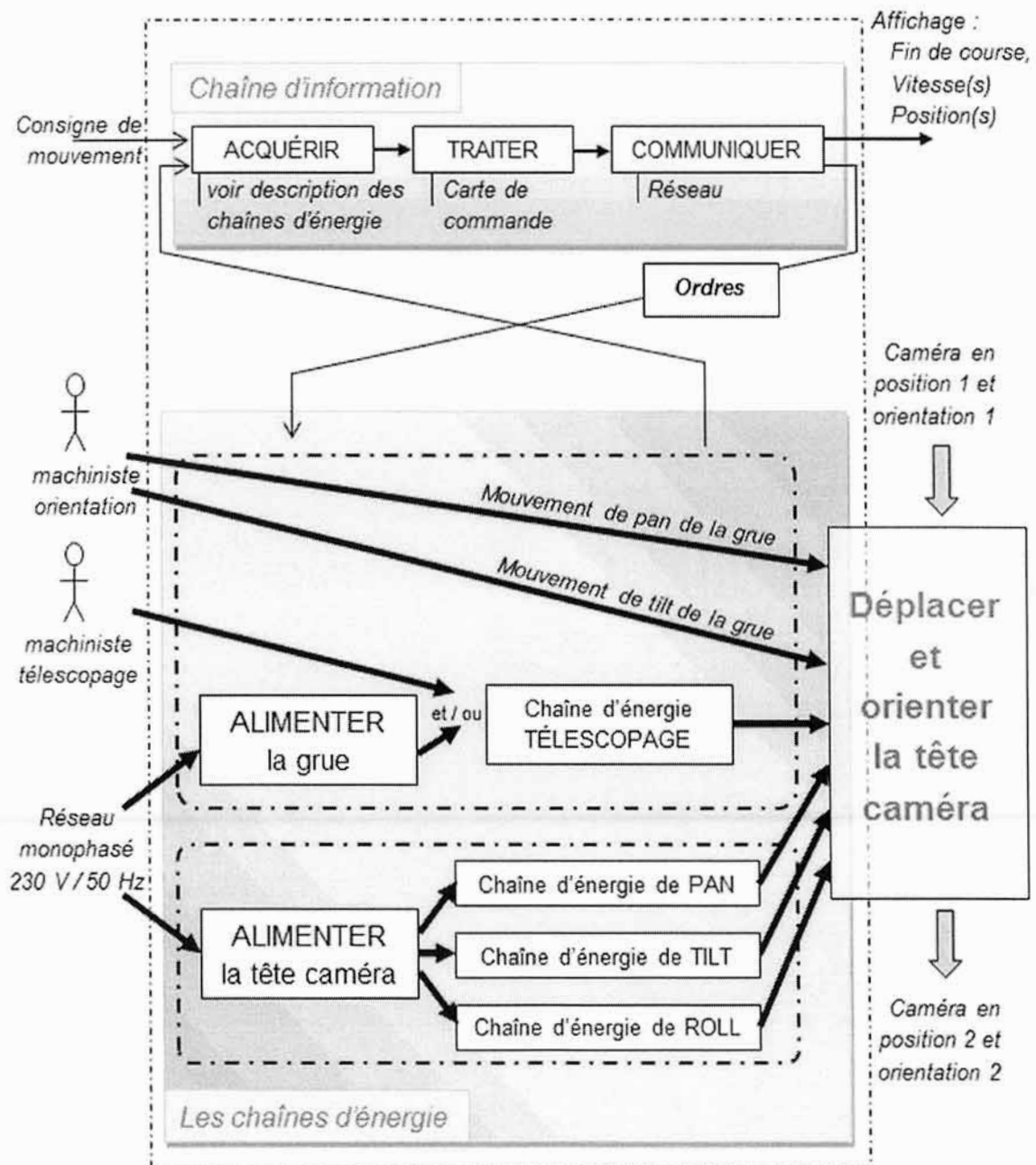
Proposition d'agencement du tableau :

Question n°	Nom valeur	Valeur calculée	Valeur attendue

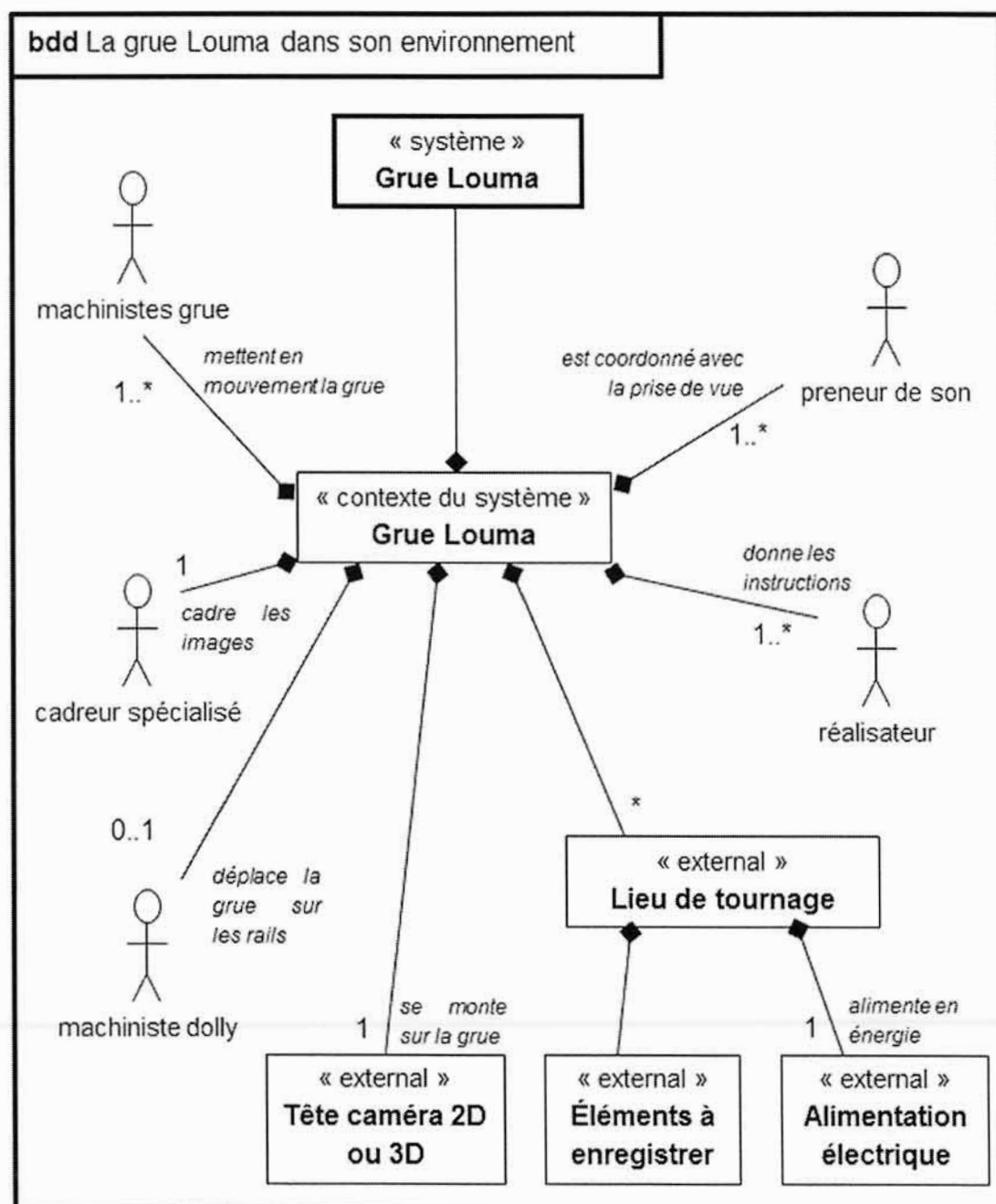
Les annexes

Annexe 1 - Les chaînes fonctionnelles de la grue

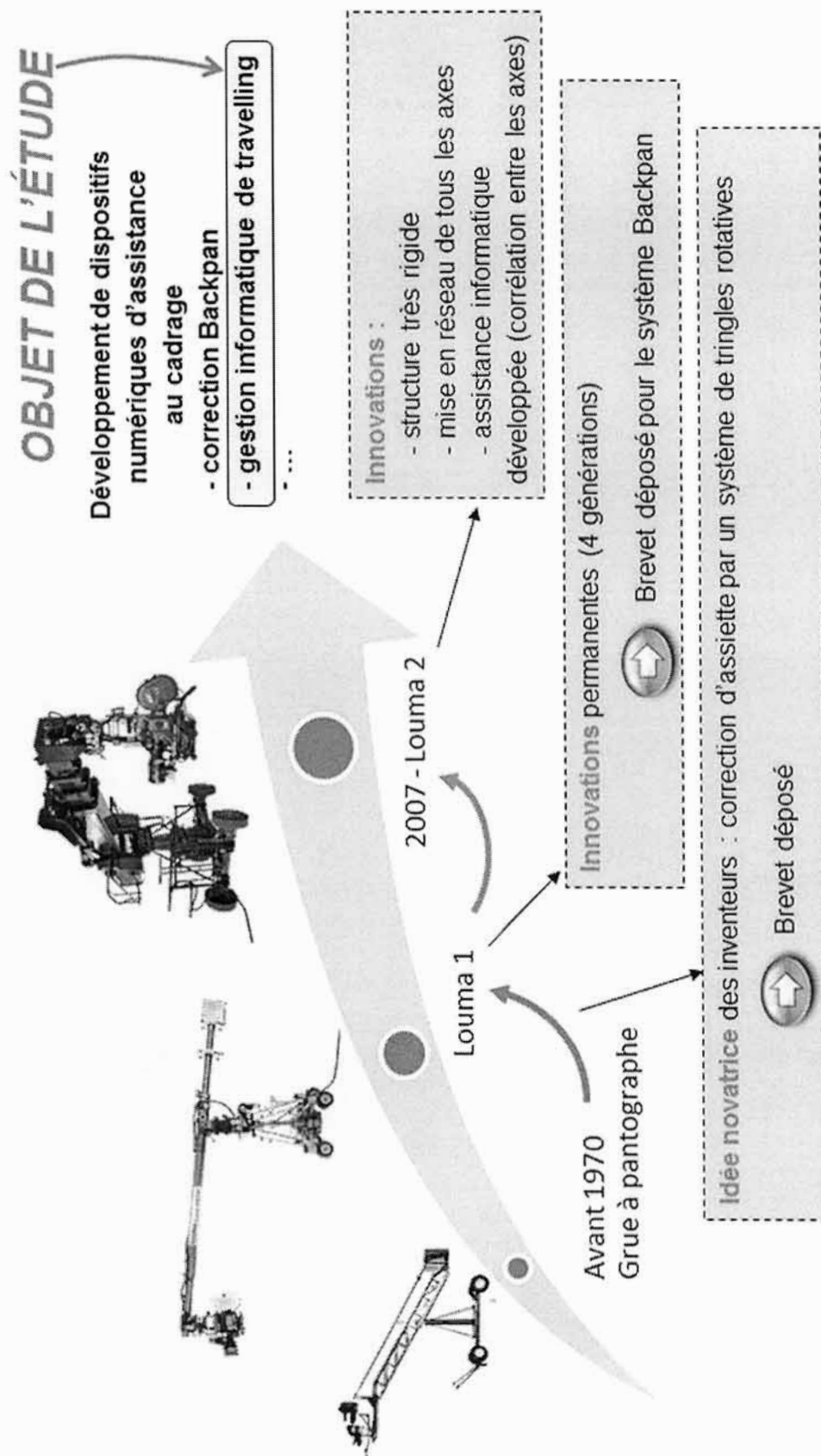
Tous les axes sont mis en réseau. Il n'y a donc qu'une chaîne d'information recevant toutes les consignes et mesures et envoyant les ordres vers toutes les chaînes d'énergie.



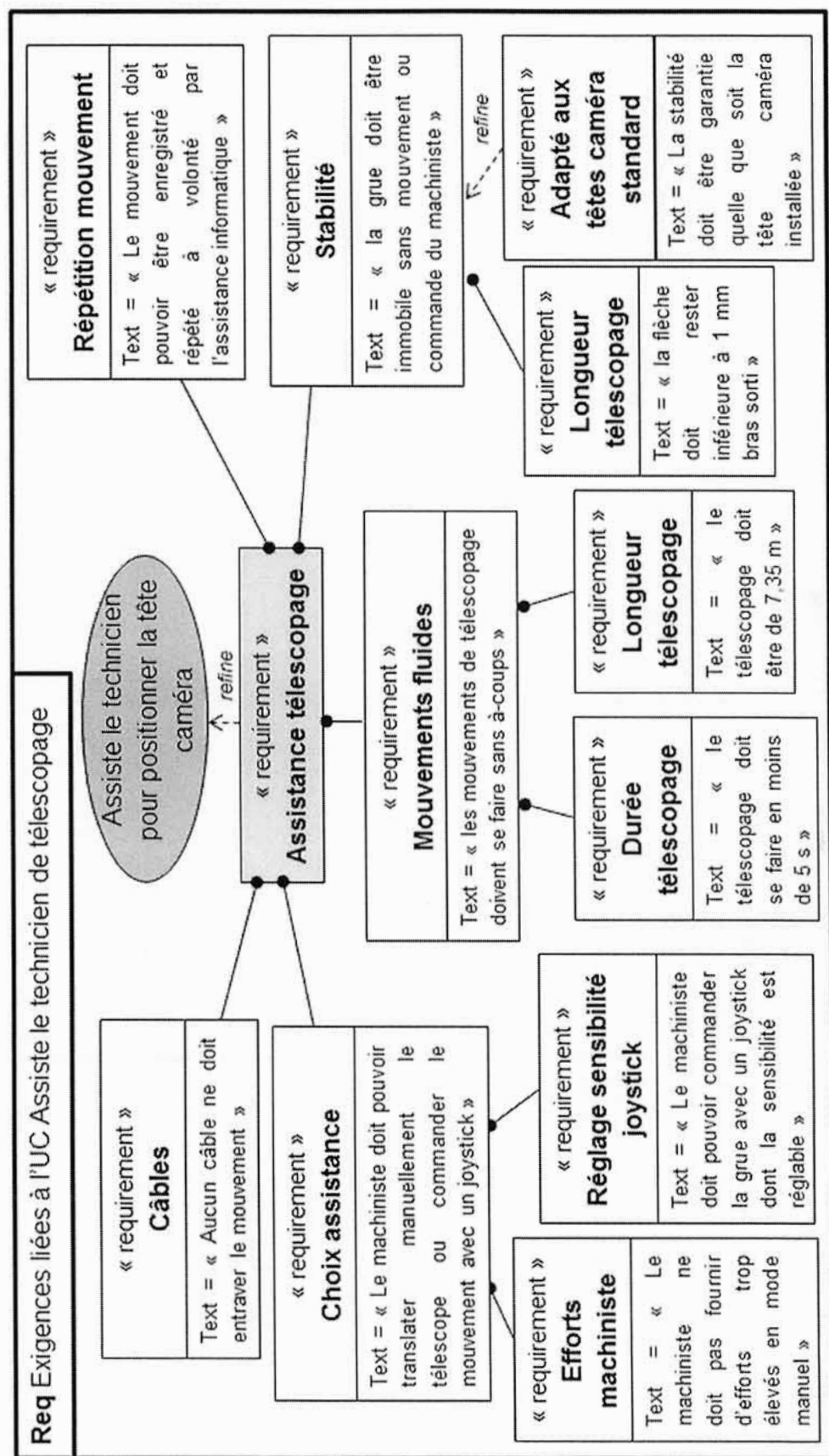
Annexe 2 - Le contexte de la grue Louma2



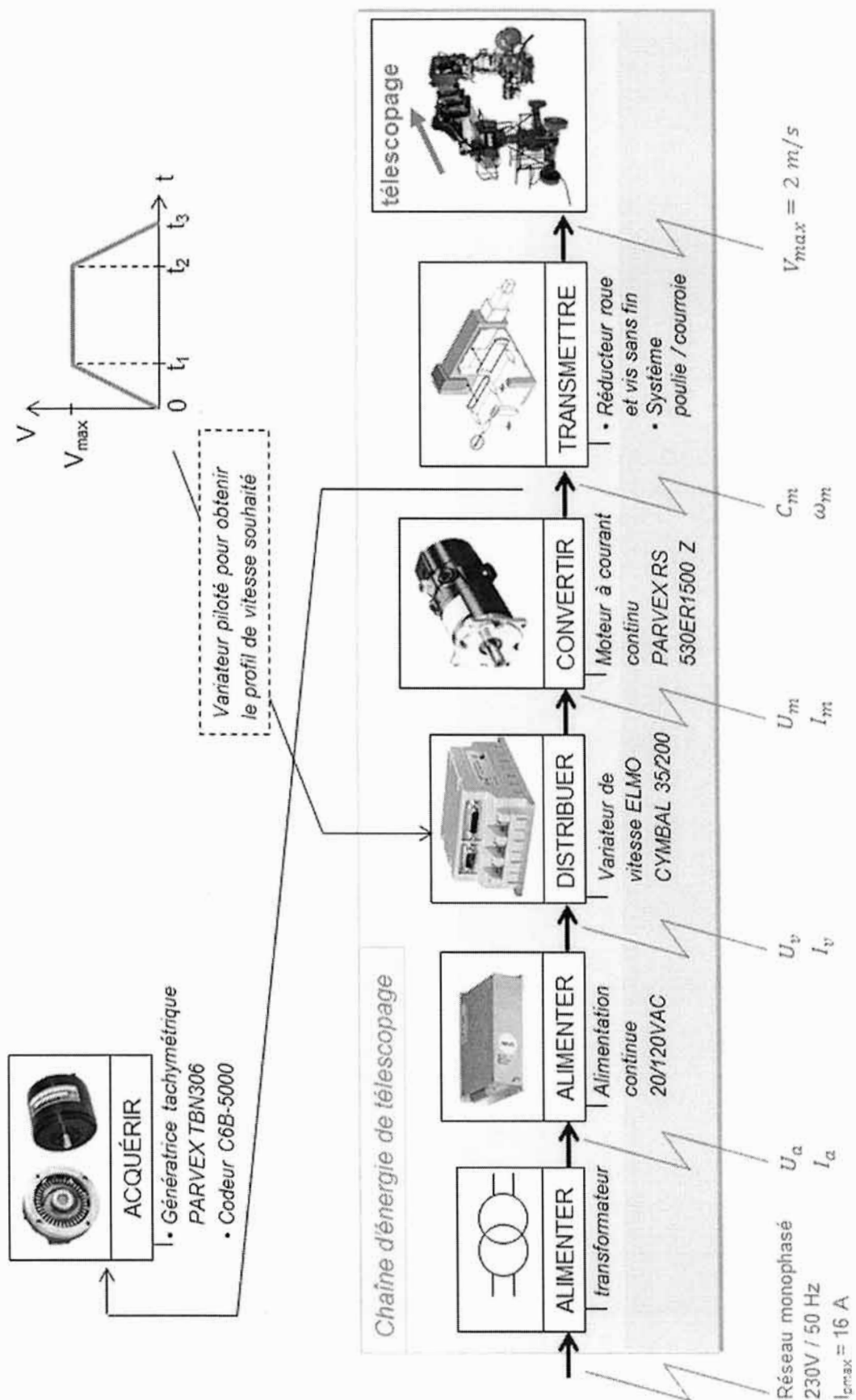
Annexe 3 - Évolution du produit



Annexe 4 - Extrait du cahier des charges de la Louma2



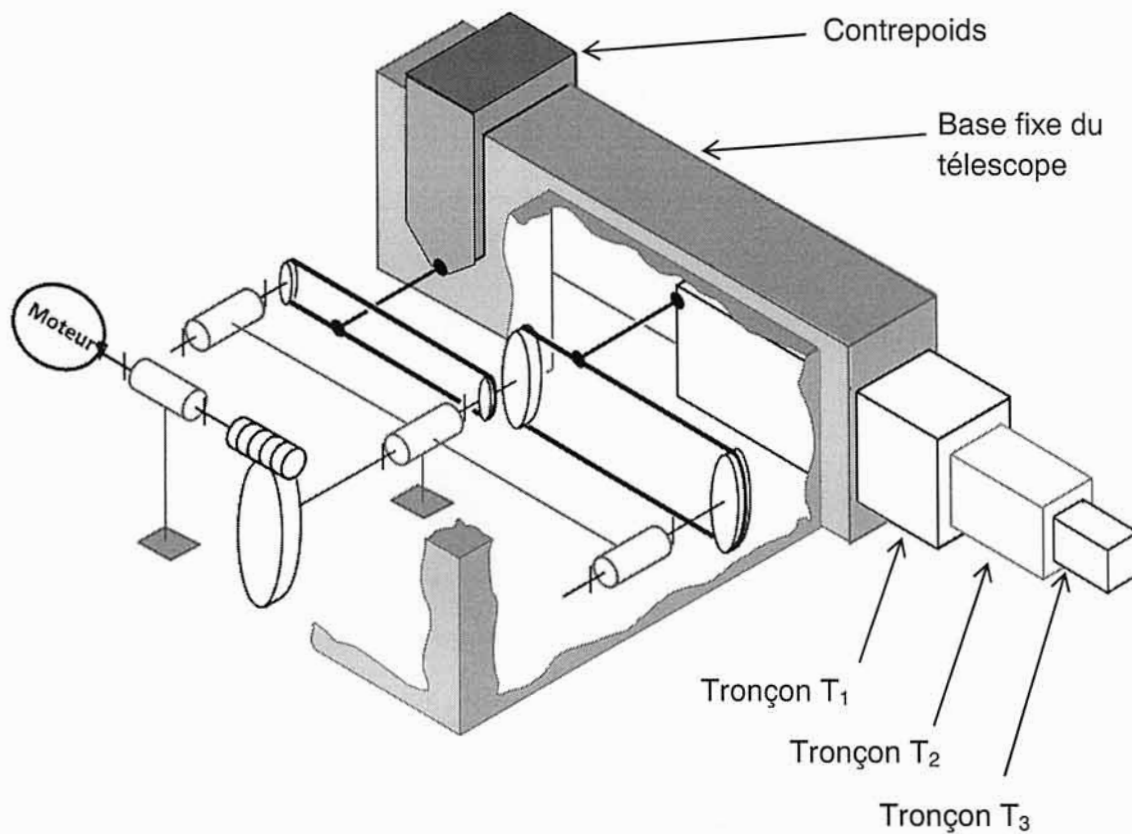
Annexe 5 - Chaîne d'énergie de TÉLESCOPAGE



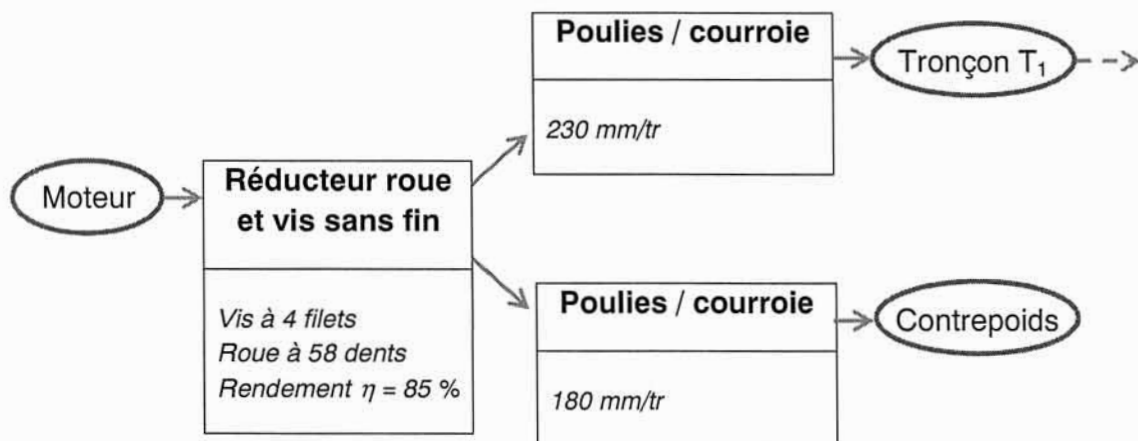
Annexe 6 - Schéma de principe de la chaîne de transmission de puissance

La mise en mouvement du contrepoids est valable pour la partie 1 uniquement.

La mise en mouvement des tronçons 2 et 3 n'est pas représentée.



Caractéristiques de la chaîne de transmission de puissance

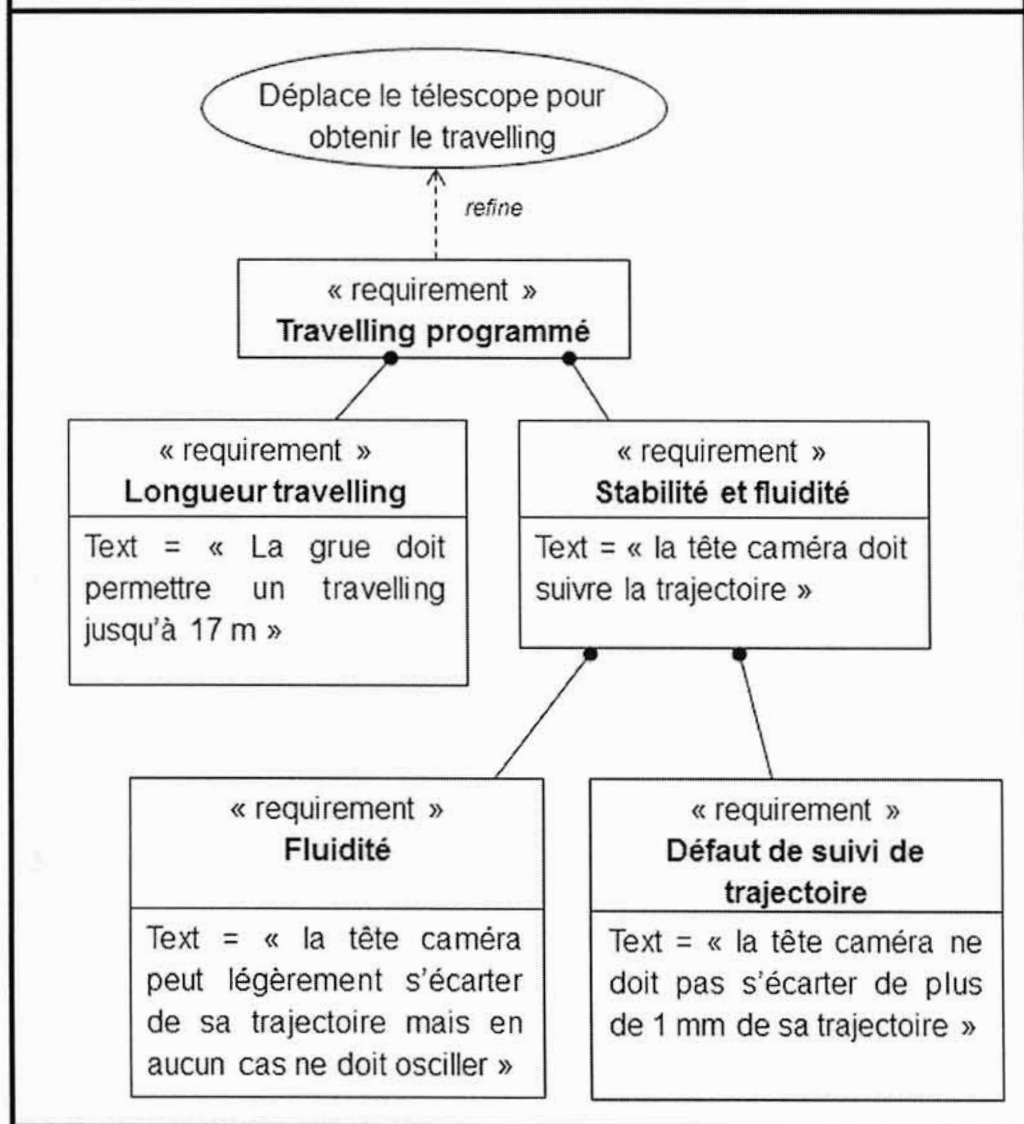


Annexe 7 - Moteur PARVEX série RS

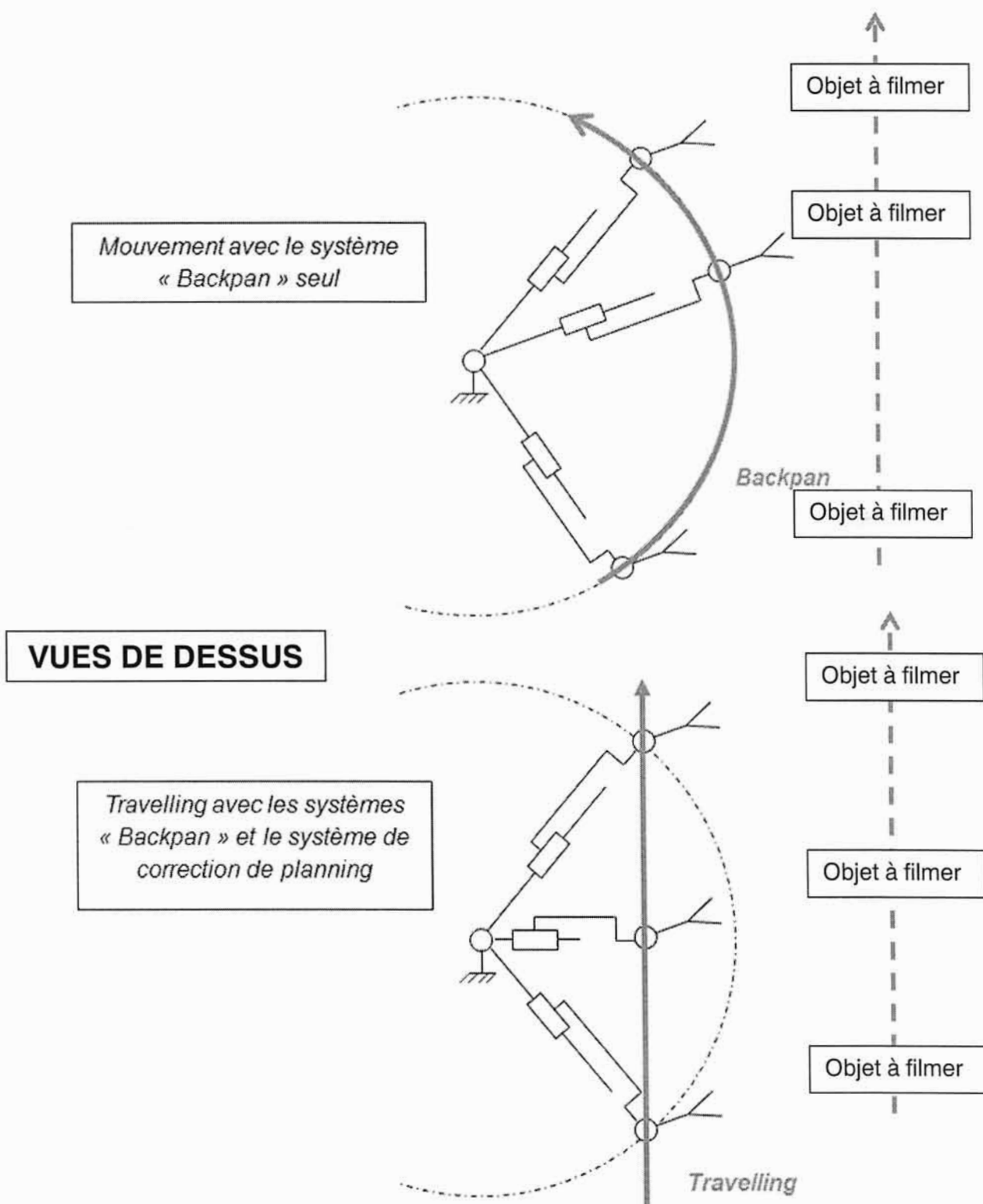
TYPES MOTEURS	Couple permanent en rotation lente	Courant permanent en rotation lente	Tension d'alim. de définition	Vitesse de définition	Courant impulsion.	F.E.M. par 1000 tr/min (à 25°C)	Constante de couple par ampère	Résistance du bobinage (à 25°C)	Inductance du bobinage	Moment d'inertie du rotor	Constante de temps thermique	Masse du moteur
Symboles	M ₀	I ₀	U	N	I _{max}	Ke	Kt	Rb	L	J	T _{th}	M
Unités	N.m	A	V	tr/min	A	V	N.m/A	Ω	mH	10 ⁻⁵ kg.m ²	min	kg
RS 210 L	0,11	2,5	24	3000	7	5	0,048	2,33	1,1	1,3	5	0,54
RS 220 F	0,225	4,1	25,4	3000	12	6	0,057	1,12	0,65	1,95	6,9	0,7
RS 220 K	0,232	2,8	38,6	3000	8	9,2	0,088	2,7	1,53	1,95	6,9	0,7
RS 230 C	0,31	5,6	24	3000	18	6	0,057	0,67	0,42	2,6	7,5	0,86
RS 240 B	0,39	6	27,6	3000	20	7,2	0,068	0,68	0,45	3,25	7,5	1
RS 310 N	0,28	2,6	49	3000	7	12,3	0,117	3,64	4,4	5,4	9	0,9
RS 320 H	0,54	4,5	49	3000	13	13,3	0,127	1,52	2,2	8,3	7	1,3
RS 330 E	0,78	5,9	51	3000	18,5	14,3	0,137	1	1,65	11	6,2	1,6
RS 340 C	0,98	6,9	53	3000	23	15,3	0,146	0,8	1,4	14	6	2
RS 410 R	0,48	3,6	60	3000	10	15,6	0,15	2,47	4,2	13,7	14	1,2
RS 420 J	0,93	6,2	60	3000	19	16,6	0,16	0,96	1,9	22,5	12,5	1,8
RS 430 F	1,3	8,1	43	2000	28	17,5	0,167	0,59	1,33	31	11,5	2,4
RS 430 H	1,36	6,6	78	3000	21	22,5	0,215	0,94	2,2	31	11,5	2,4
RS 440 G	1,74	7	90	3000	24	27	0,256	0,9	2,2	40	10,5	3
RS 510 L	1,9	7,9	82	2700	21	26,6	0,254	0,71	3,6	100	18	5,1
RS 520 G	3,1	10,9	92	2700	32	31	0,296	0,4	2,34	135	17,8	6,3
RS 530 E	4	13	97	2700	42	33	0,32	0,29	1,74	170	19	7,5
RS 540 C	5	15	104	2700	50	36	0,344	0,225	1,5	205	20,6	8,7
RS 620 G	8	22,3	100	2400	82	38,5	0,37	0,155	1,78	530	26,7	11,5
RS 630 F	10,8	25	100	2000	90	46	0,44	0,134	1,62	680	31	14
RS 640 E	13	28	105	2000	90	49	0,47	0,12	1,38	830	32,7	16,3

Annexe 8 - Nouvelles exigences liées au travelling

Req Exigences liées à l'UC « Déplace le télescope pour obtenir le travelling »



Annexe 9 - Les corrections de « Backpan » et de planning



Annexe 10 - Paramétrage pour l'étude de compensation du planning

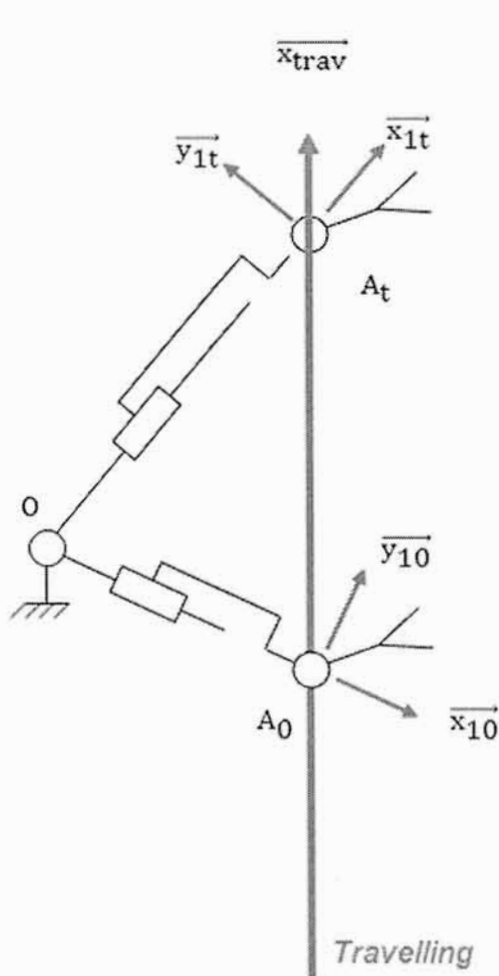


Figure A

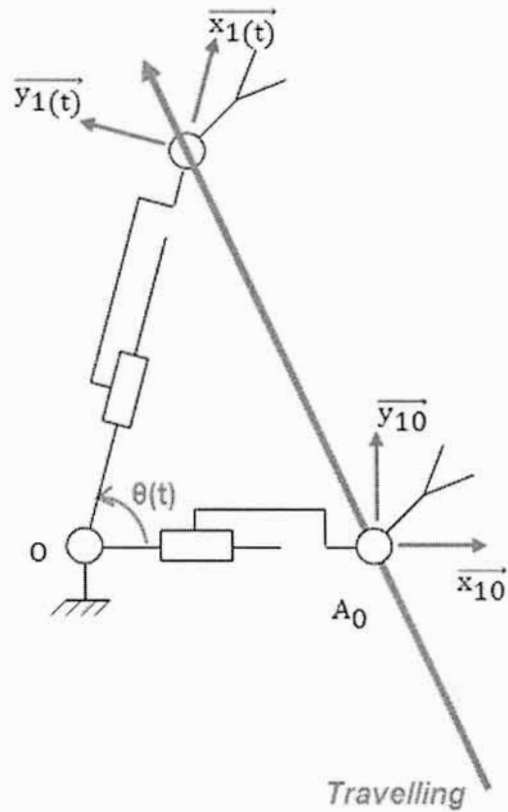
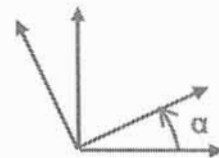


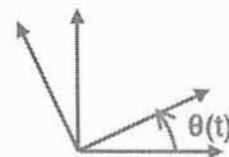
Figure B - Schéma « redressé »

α est un angle constant définissant la direction du travelling par rapport à la direction initiale du bras télescopique.



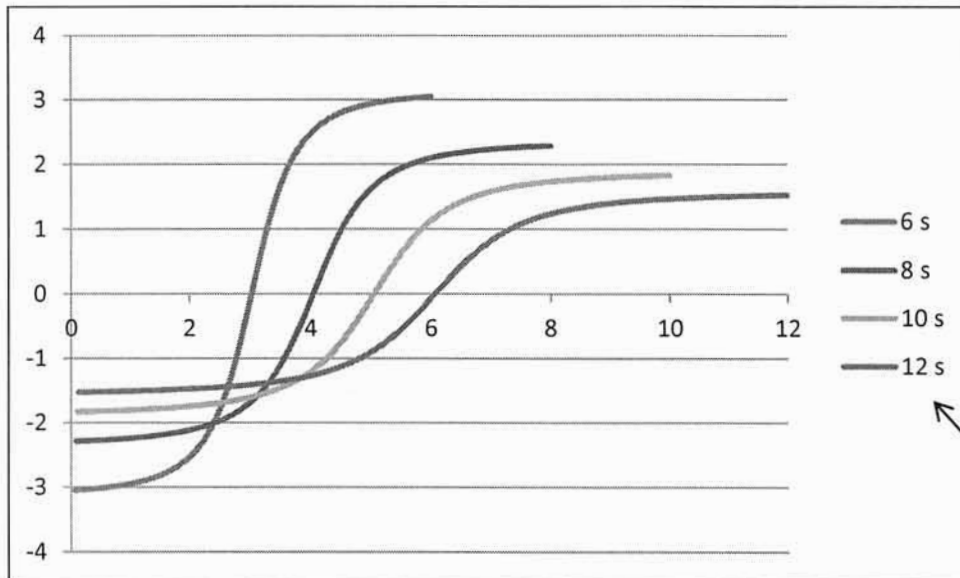
On note $d(t)$, la distance parcourue lors du travelling, à l'instant t après le début du mouvement. On a donc

$\theta(t)$ est l'angle parcouru par le bras depuis sa position initiale (au début du travelling).

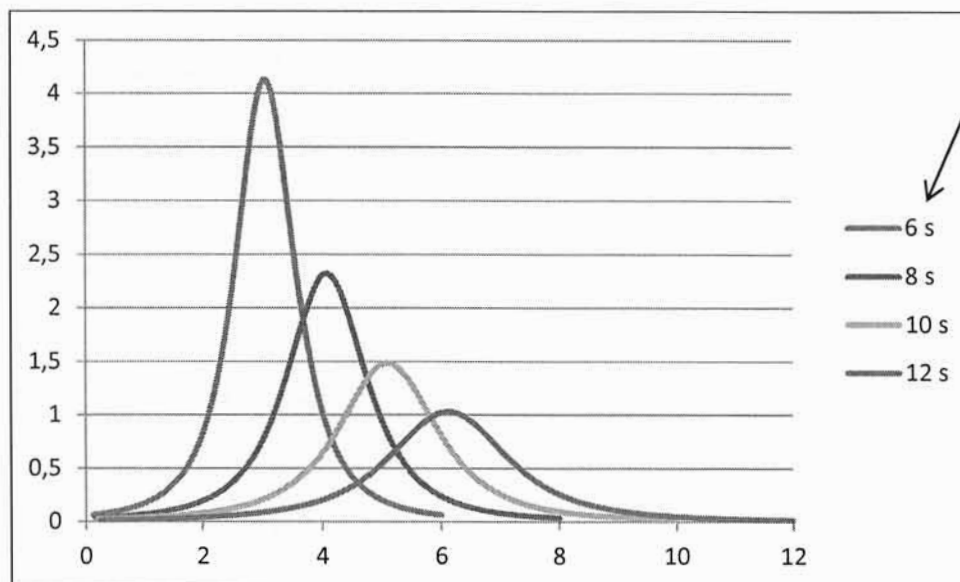


Annexe 11 - Évolution de la vitesse et de l'accélération de télescopage pour un mouvement de travelling

Évolution de $V_{\text{télescopage}} = V_{\text{cam}}$ en fonction de la durée de télescopage :



Évolution de $a_{\text{télescopage}}$ en fonction de la durée de télescopage :

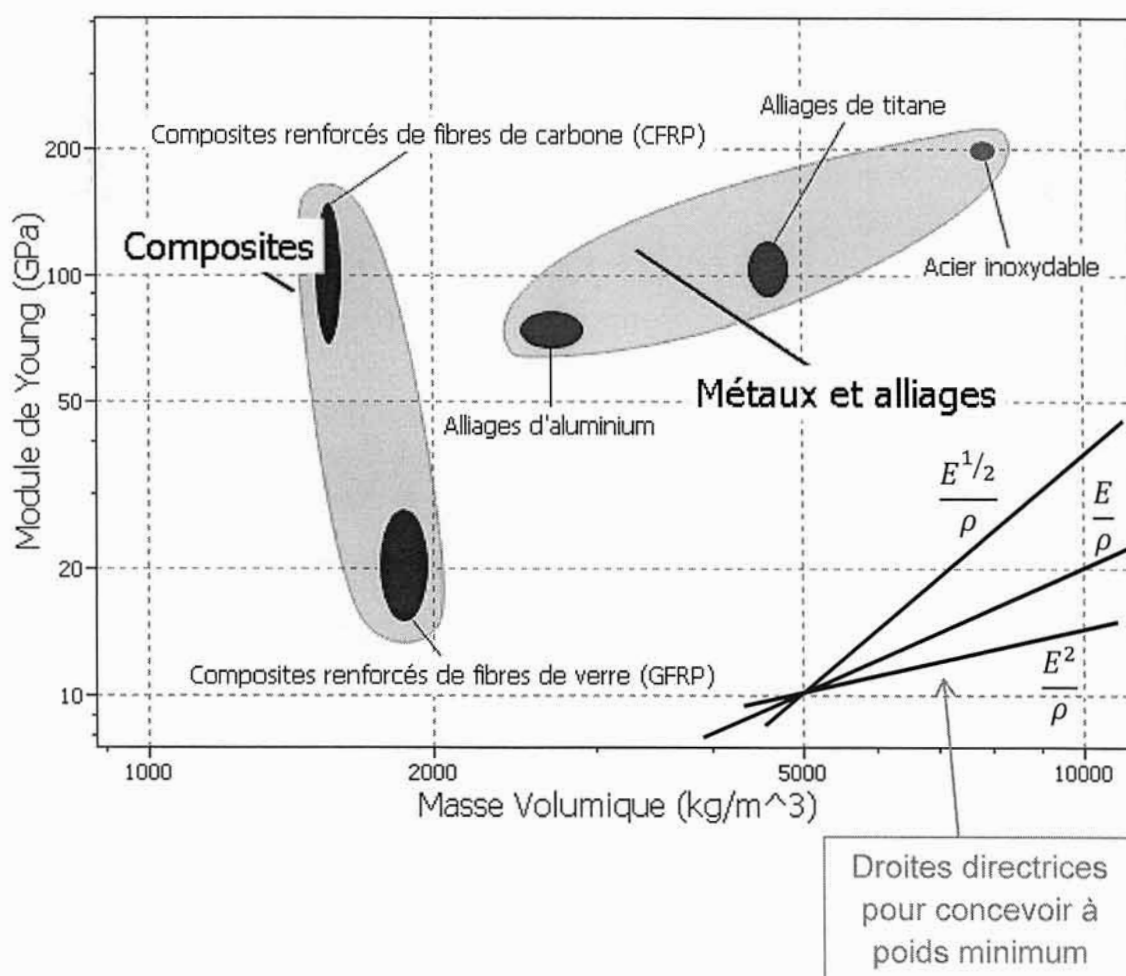


Durée de
télescopage

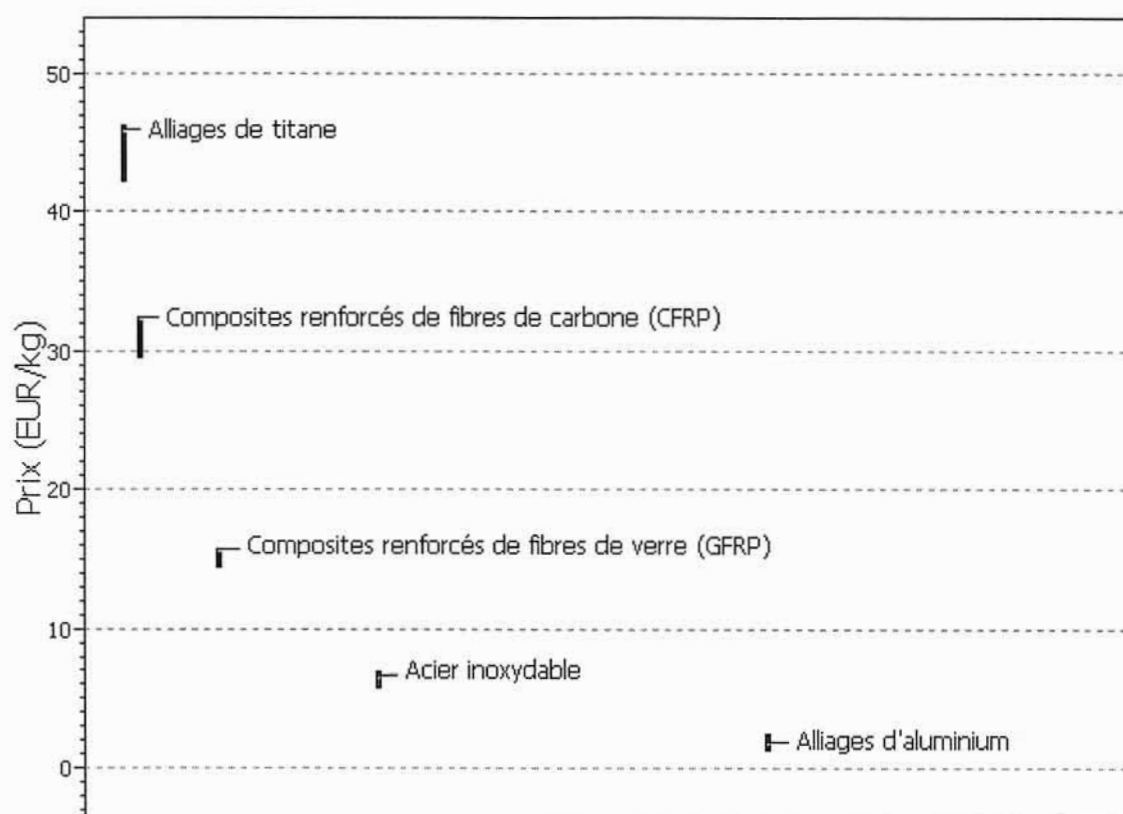
Annexe 12 - Classement des matériaux suivant leur module d'Young et leur masse volumique

Objectif : minimiser la masse

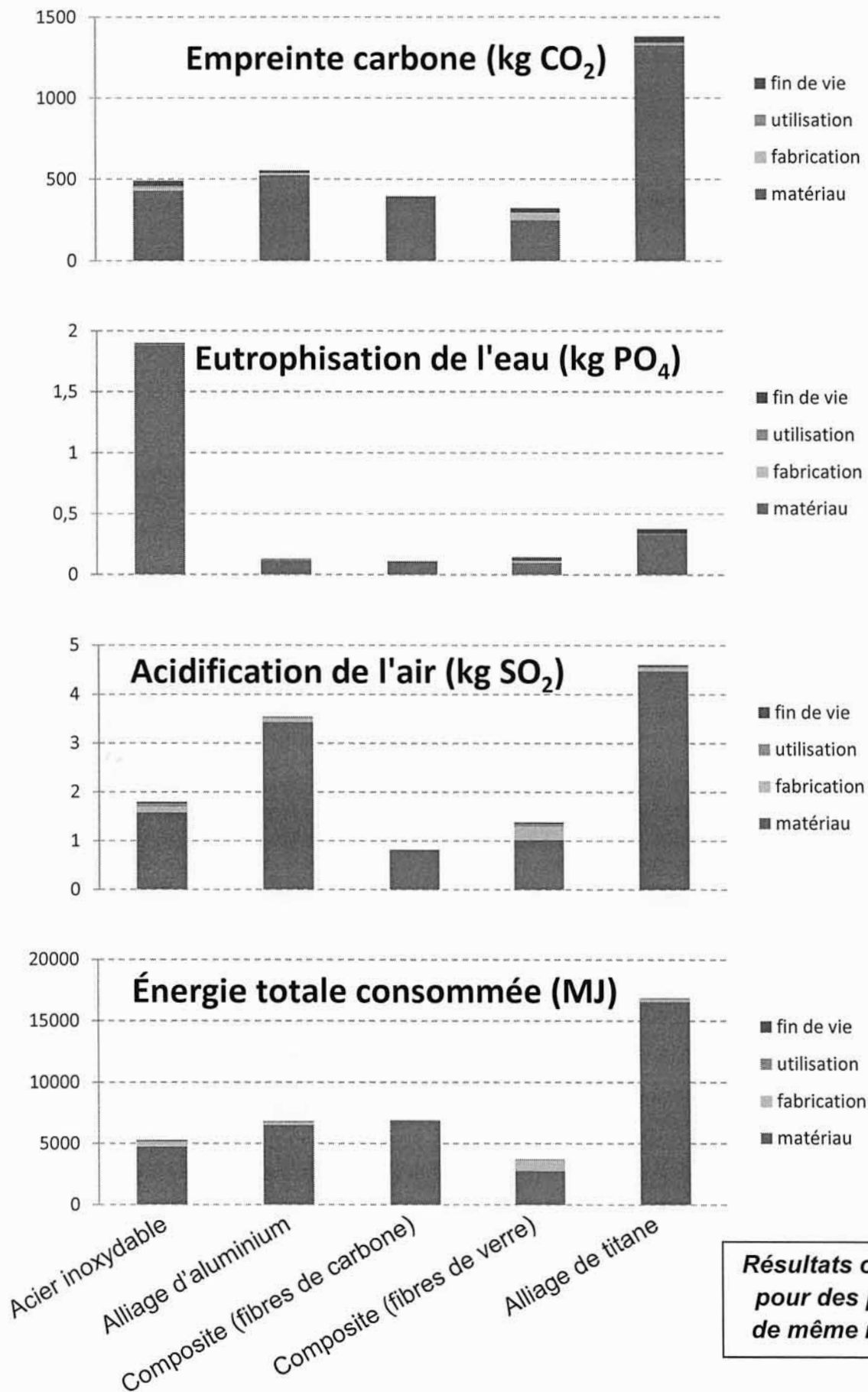
Forme	Sollicitation	Astreintes de conception	Indice de performance
poutre	traction	Rigidité et longueur fixes. Section libre	$\frac{E}{\rho}$
poutre	flexion	Rigidité, forme et longueur fixes. Section libre.	$\frac{E^{1/2}}{\rho}$
poutre	flexion	Rigidité, hauteur et longueur fixes. Largeur libre.	$\frac{E}{\rho}$
poutre	flexion	Rigidité, largeur et longueur fixes. Hauteur libre.	$\frac{E^{1/3}}{\rho}$
plaque	flexion	Rigidité, longueur, largeur fixe, Epaisseur libre.	$\frac{E^{1/3}}{\rho}$
poutre	flexion	Solidité, hauteur et longueur fixes. Largeur libre.	$\frac{\sigma_e}{\rho}$



Annexe 13 - Prix relatifs de quelques matériaux (coût matière seule)



Annexe 14 - Impact environnemental simulé



Notations utilisées et glossaire

Symbole	Signification
A_0, A_t	Positions initiale et à l'instant t de la tête caméra
$a_{caméra}$	Accélération de la caméra
<i>Backpan ou Back Pan</i>	Compensation de la visée lors d'un panoramique
C_M	Couple moteur
$d(t)$	Distance parcourue par la tête caméra lors d'un mouvement de travelling
E	Module d'Young
$f_{éq}$	Frottements visqueux ramenés sur l'arbre moteur
G_{cd}	Centre de gravité de la partie déroulée du câble
I_{Gz}	Moment quadratique
$J_{éq}$	Inertie des parties mobiles ramenée sur l'axe moteur
J_{mot}	Inertie de l'arbre moteur
$l_0, l(t)$	Longueur initiale et à l'instant « t » du bras
M_1, M_2, M_3	Masse des tronçons 1, 2 & 3
M_{cam}, M_{ctp}	Masse de la tête caméra et du contrepoids
P, P_1, P_2	Poids linéique du bras (1 bras rentré, 2 bras sorti)
<i>Pan</i>	Panoramique
P_C	Poids de la tête caméra
<i>Roll</i>	Roulis
<i>Télescopage</i>	Réglage de la longueur du bras
<i>Tilt</i>	Inclinaison
<i>Travelling</i>	Translation (rectiligne ou circulaire) de la caméra
$V_{cam} = V_{télescopage}$	Vitesse de déplacement de la caméra suivant l'axe de télescopage
V_{ctp}	Vitesse de déplacement du contrepoids suivant l'axe de télescopage
$v_{(L)}$	Flèche en bout du bras
$x(t)$	Position réelle du tronçon 3
$x_{cor}(t)$	Consigne de correction de la position du contrepoids
$x_{cor\ réel}(t)$	Correction réelle de la position du contrepoids
α	Angle constant formé entre la direction du mouvement de travelling et la direction initiale du bras
η	Rendement
$\theta(t)$	Angle à l'instant « t » formé entre les positions initiale et finale du bras de la grue
μ	Masse volumique linéique du câble
ρ	Masse volumique
$\dot{\omega}_m, \omega_m$	Accélération et vitesse angulaires de l'axe moteur