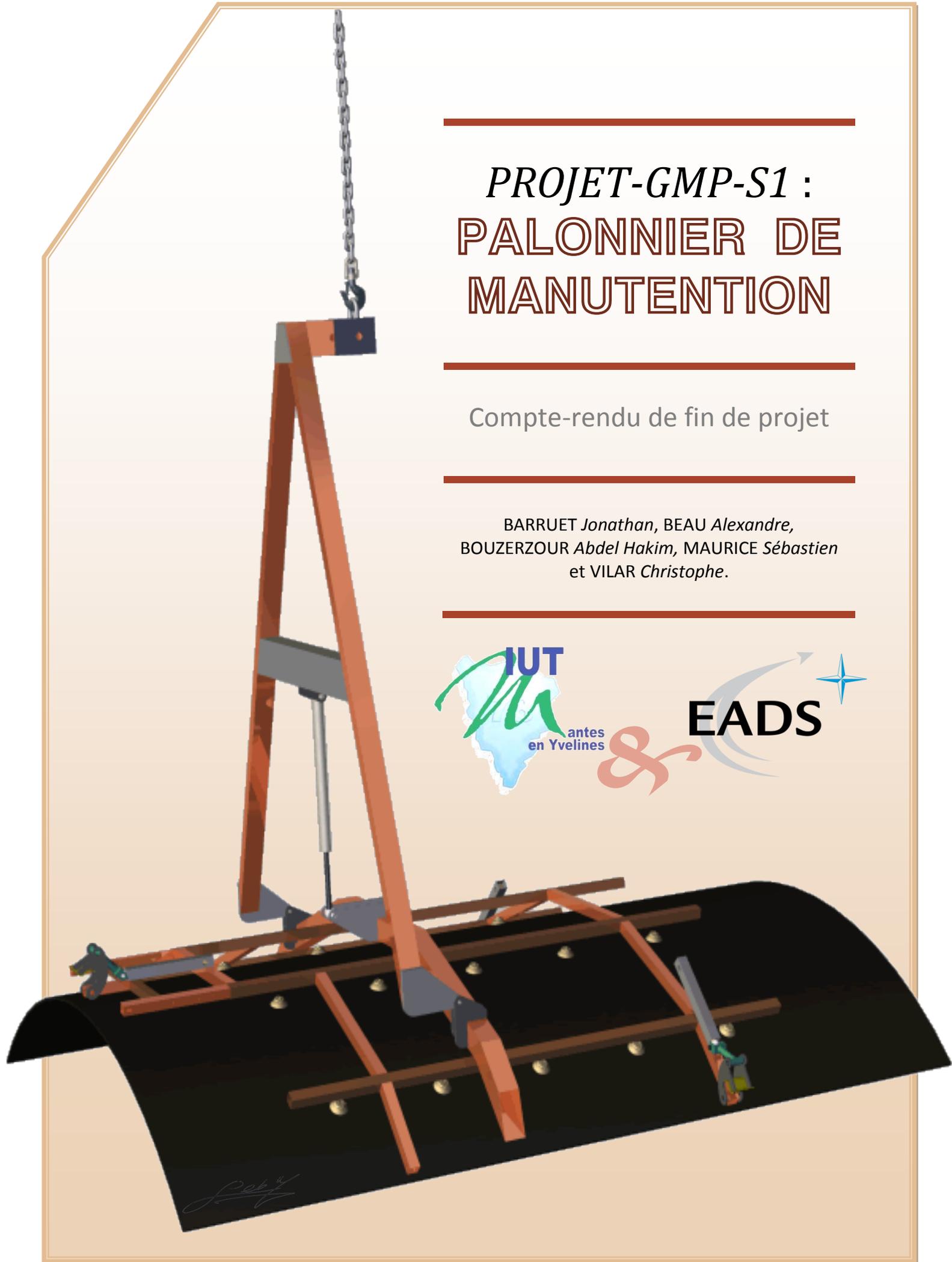

PROJET-GMP-S1 : PALONNIER DE MANUTENTION

Compte-rendu de fin de projet

BARRUET *Jonathan*, BEAU *Alexandre*,
BOUZERZOUR *Abdel Hakim*, MAURICE *Sébastien*
et VILAR *Christophe*.



Sommaire

1	PRESENTATION	4
1.1	EADS.....	4
1.2	Notre projet : en analyse fonctionnelle.....	5
1.2.1	Résumé du Cahier des Charges.....	5
1.2.1.1	Les besoins du client	5
1.2.1.2	Travaux à effectuer.....	5
1.2.1.3	Déroulement des opérations de manutention	6
1.2.1.4	Caractéristiques des différents panneaux	7
1.2.2	Analyse du besoin.....	8
1.2.2.1	La recherche du besoin (bête à corne).....	8
1.2.2.2	La validation du besoin.....	8
1.2.2.3	Identification des éléments de l'environnement.....	9
1.2.2.4	La recherche des séquences.....	9
1.2.2.5	La recherche des fonctions	9
1.2.2.6	Diagrammes pieuvres	10
1.2.2.7	Gantt réaliste	11
2	TRAVAUX EFFECTUES:	12
2.1	Modélisation CAO.....	12
2.1.1	Introduction	12
2.1.2	Panneau Sandwich/ SYLDA.....	12
2.1.3	Moule d'autoclave.....	13
2.1.4	Rack de stockage des panneaux.....	13
2.1.5	Bâti de détournage	14
2.1.6	Bâti de basculement	14
2.1.7	Autres	14
2.2	Les ventouses.....	15
2.2.1	Recherche de cahier constructeur	15
2.2.2	Finalité	16
2.2.3	Les tests	17
2.3	Structure du palonnier	18
2.3.1	Type de profilé	18
2.3.2	Support de ventouse.....	18
2.3.3	Structure en araignée	18
2.4	Cinématique.....	19
2.4.1	Mouvement de rotation	19
2.4.2	Sécurité Mécanique	19
2.4.3	Réglage de longueur du palonnier	20

2.5	Nouveau chariot des racks de stockage	21
2.6	Principe de fonctionnement du système VGS	21
2.7	Les vérins	22
2.8	Dimensionnement Des Structures (DDS)	24
2.8.1	<i>Pourquoi ?</i>	24
2.8.2	<i>Les moyens d'améliorer le comportement à la résistance aux contraintes</i>	24
2.8.3	<i>Flexion</i>	25
2.8.3.1	<i>Structures en acier</i>	25
2.8.3.2	<i>Structures en aluminium</i>	28
2.8.4	<i>Cisaillement</i>	30
2.9	Cinétique, Centre de Gravité, équilibre.....	31
2.9.1	<i>Situation</i>	31
2.9.2	<i>Position verticale</i>	32
2.9.3	<i>Position baissé</i>	32
2.9.4	<i>Résultat : un déséquilibre</i>	33
2.9.5	<i>Solution</i>	33
2.10	Automatisme	34
2.10.1	<i>Introduction des variables / Automgen</i>	34
2.10.2	<i>Grafsets</i>	35
2.10.3	<i>Câblages</i>	36
3	CONCLUSION / ...SUITE ?	37
3.1	Finalité de l'avant projet.....	37
3.2	L'année prochaine ?	38
4	ANNEXES	39
4.1	Contacts	39
4.1.1	<i>Etudiants</i>	39
4.1.2	<i>EADS</i>	40
4.1.3	<i>Aides des professeurs de l'IUT</i>	40
4.2	Calculs de RDM	41
4.3	Croquis.....	43
4.3.1	<i>Liaisons pivot vertical et liaison rotule</i>	43
4.3.2	<i>Chariot de rack retourné</i>	43
4.3.3	<i>Palonniers</i>	44
4.4	Dessin d'ensemble du palonnier	47

1 PRESENTATION

1.1 EADS

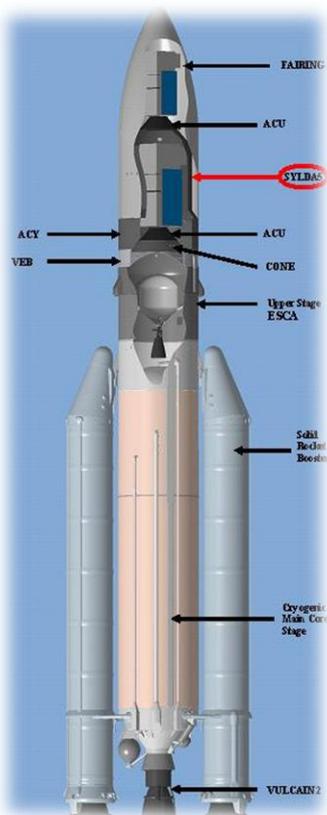
Le groupe **EADS** est le leader mondial des secteurs de l'**aéronautique**, de l'**espace**, et de la **défense**. Le groupe EADS est constitué de plusieurs filiales notamment **Airbus** et **Eurocopter** pour ce qui est de l'aérien, et **EADS-ASTRIUM** leader européen des programmes spatiaux tel qu'**ARIANE** ou *Galileo*.



Notre projet est en relation directe avec ce dernier secteur (spatial) : Un projet demandé par **EADS-ASTRIUM des Mureaux**, dans le secteur des composites.

Le site de EADS-ASTRIUM aux Mureaux s'occupe essentiellement de la fabrication des **missiles M51** et de certaines parties d'**ARIANE 5**, notamment le **SYLDA** (Système de lancement double d'ARIANE : partie supérieure d'ARIANE 5 qui lui permet de transporter deux satellites) :

ARIANE 5 :



Le SYLDA :



1.2 Notre projet : en analyse fonctionnelle

1.2.1 Résumé du Cahier des Charges

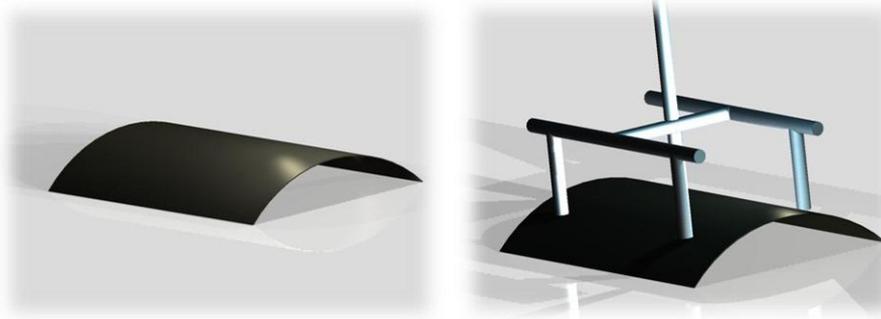
Le **cahier des charges** (réf. : A5 ST 164X1004-EADS) de notre étude nous a été spécifié par EADS, en voici l'idée générale :

1.2.1.1 Les besoins du client

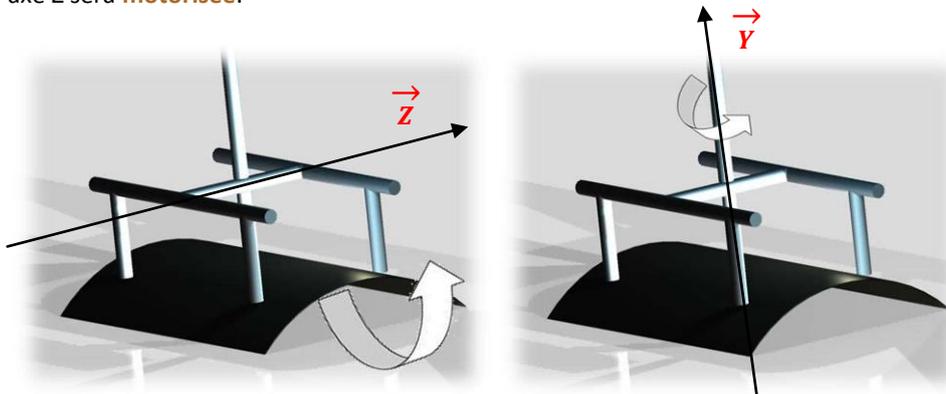
La présente spécification a pour objet de définir les exigences nécessaires pour l'étude d'un **palonnier de manutention**. Ce projet a pour but de répondre à la **montée en cadence d'ARIANE 5** et de garantir le bon **fonctionnement du moyen sur 10 ans minimum**.

1.2.1.2 Travaux à effectuer

✓ Le palonnier doit permettre la **manutention de panneaux sandwich** (peau en fibre de carbone, âme en nid abeille aluminium) avec une prise par ventouses coté « extra » ou « intra » dos :



✓ Il devra assurer les **mouvements de rotation** autour des axes Y, Z avec blocage en position, la rotation autour de l'axe Z sera **motorisée**.



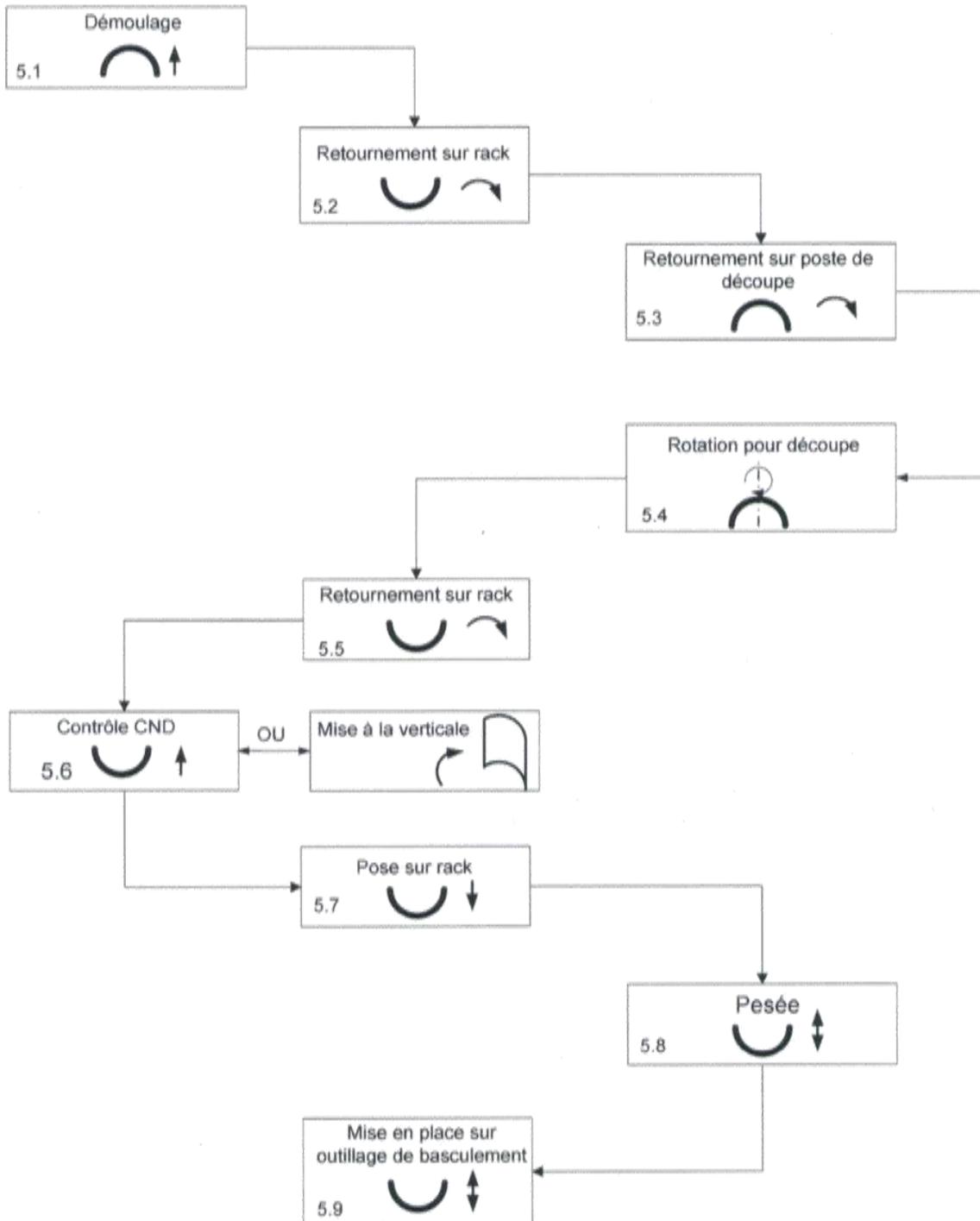
✓ Le palonnier devra être **autonome en énergie** pour alimenter des ventouses, le mouvement de rotation et un boîtier de commande.

✓ Les mouvements peuvent être **commandés par boîtier** à fil ou radio avec arrêt d'urgence.

✓ Etudier la modification des **racks de stockage**, pour optimiser l'utilisation du palonnier.

✓ Etudier un **chariot avec timon** qui recevra le palonnier pour les transports inter atelier et le stockage

1.2.1.3 Déroulement des opérations de manutention

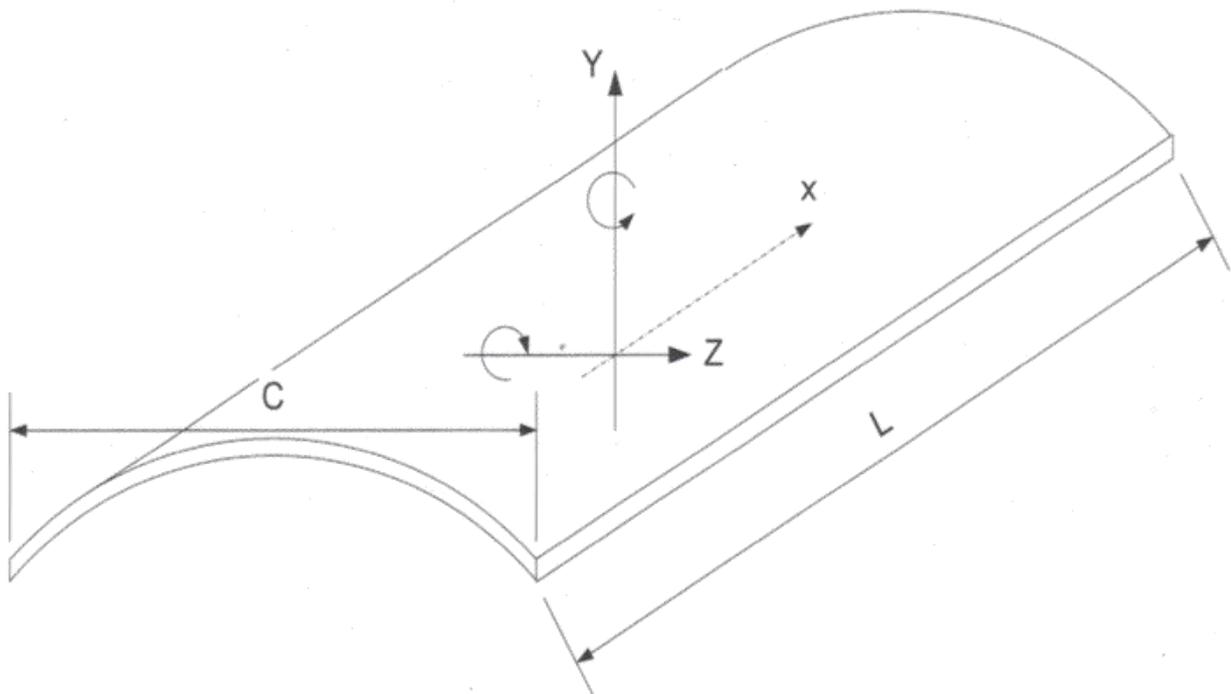


1.2.1.4 Caractéristiques des différents panneaux

Le palonnier doit permettre la manutention de panneau sandwich fibre de carbone, nida alu, avec prise par ventouses coté extra dos et/ou coté intra dos

Il devra assurer les mouvements de rotation autour des axes Y, Z avec blocage en position

La rotation autour de l'axe Z sera motorisée



- les panneaux ont une longueur de : $3122 < L < 4702$

une corde de : $3223 < C < 3307$

une flèche intra dos de: $662 < F < 775$

une épaisseur de 16.4

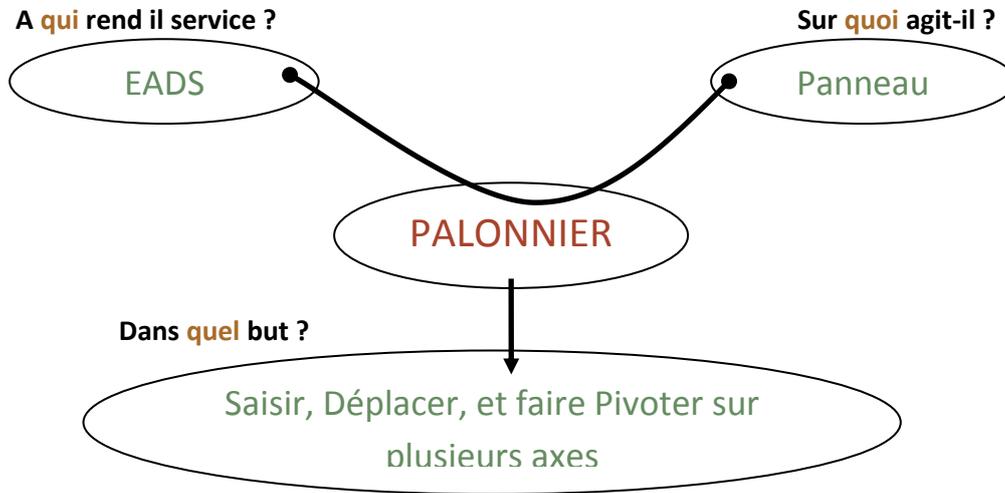
un rayon interne de 2264.3

- Masse estimée du panneau le plus grand

- 60 kg

1.2.2 Analyse du besoin

1.2.2.1 La recherche du besoin (bête à corne)



1.2.2.2 La validation du besoin

✓ Pourquoi ce produit existe-il ?

- ✚ Pour faciliter la manipulation et le transport des panneaux, et pour avoir une marge de manœuvre plus importante.
- ✚ Pour diminuer les risques sur les personnes et sur le produit.
- ✚ Garantir un certain rythme de travail (32 panneaux pas an).
- ✚ Diminuer les couts de manutention (manutention manuel de 4 à 6 personnes remplacées par une manutention à 1 personne par l'intermédiaire du palonnier).

✓ Qu'est-ce qui peut faire évoluer ce produit ?

- ✚ Evolution des technologies utilisées.
- ✚ Utilisation d'autres procédés de déplacements et de levage.

✓ Qu'est-ce qui peut faire disparaître ce produit ?

- ✚ La disparition des panneaux.
- ✚ Le remplacement des panneaux cylindriques par d'autres panneaux différents.
- ✚ La disparition du besoin de déplacement.
- ✚ Développement d'un nouveau SYLDA.

1.2.2.3 Identification des éléments de l'environnement

- | | | |
|-------------------|--------------------------|----------------------------|
| ✓ Ventouses | ✓ Pont élévateur | ✓ Commandes |
| ✓ Chariot à timon | ✓ Sol de l'atelier | ✓ Ambiance climatique/ air |
| ✓ Vérins | ✓ Opérateur/ intervenant | ✓ Panneaux sandwich |

1.2.2.4 La recherche des séquences

Séquence 1 : Palonnier à l'arrêt.

Séquence 2 : Maintenance.

Séquence 3 : Palonnier en fonctionnement.

1.2.2.5 La recherche des fonctions

➤ **Fonctions principales (FP):**

FP1 : déplacer les panneaux carbonés sur les outillages (bâti de stockage, de détournement, de basculement, et les moules d'autoclaves)

FP2 : l'utilisateur doit pouvoir commander le palonnier via le pont élévateur

➤ **Fonctions contraintes (FC) :**

FC1 : s'adapter au palonnier

FC2 : poser le palonnier sur le sol dans la séquence « Palonnier à l'arrêt »

FC3 : mettre en attente le palonnier sur un support adéquat

FC4 : Respecter les normes

FC5 : le technicien doit pouvoir accéder facilement à tous les organes

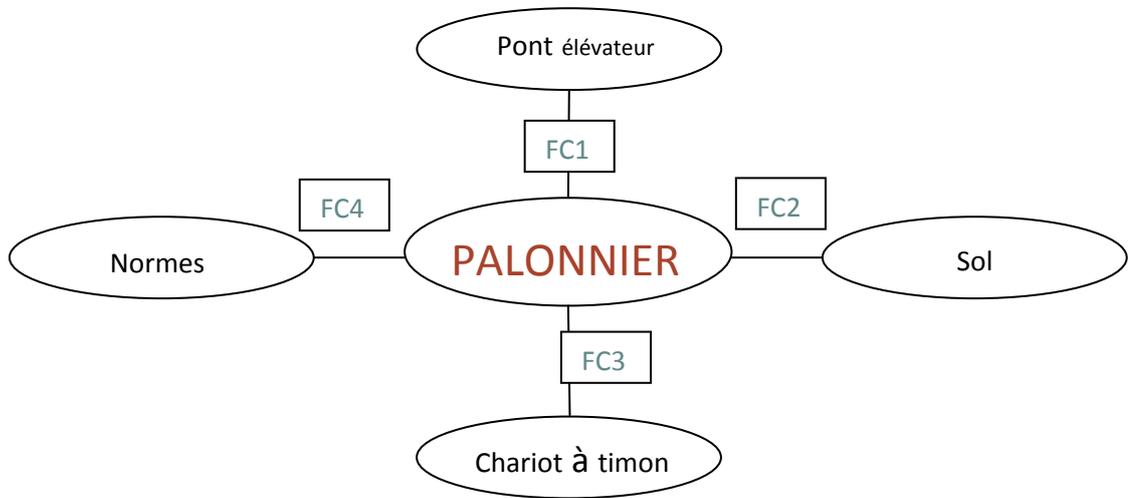
FC6 : le palonnier doit pouvoir prendre les panneaux carbonés

FC7 : doit s'adapter aux énergies disponibles

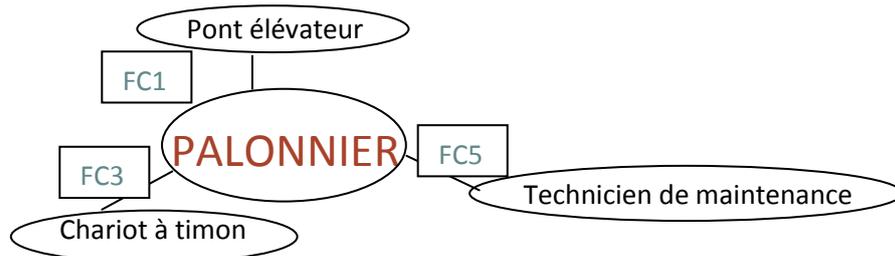
FC8 : doit s'adapter sur les outillages

1.2.2.6 Diagrammes pieuvres

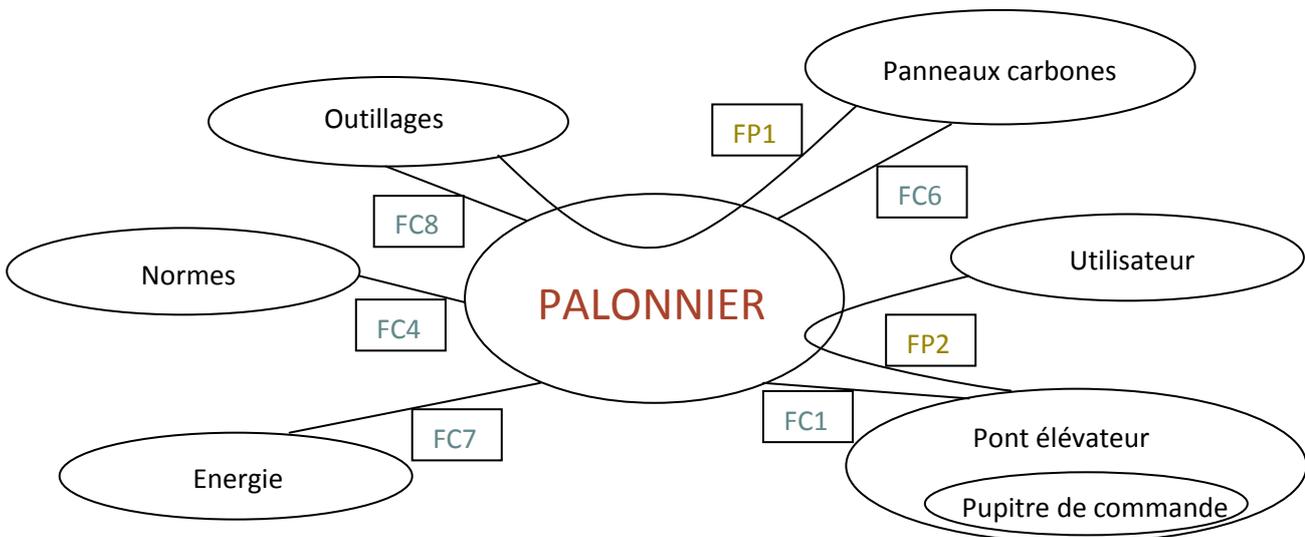
Séquence 1 : Palonnier à l'arrêt.



Séquence 2 : Maintenance.

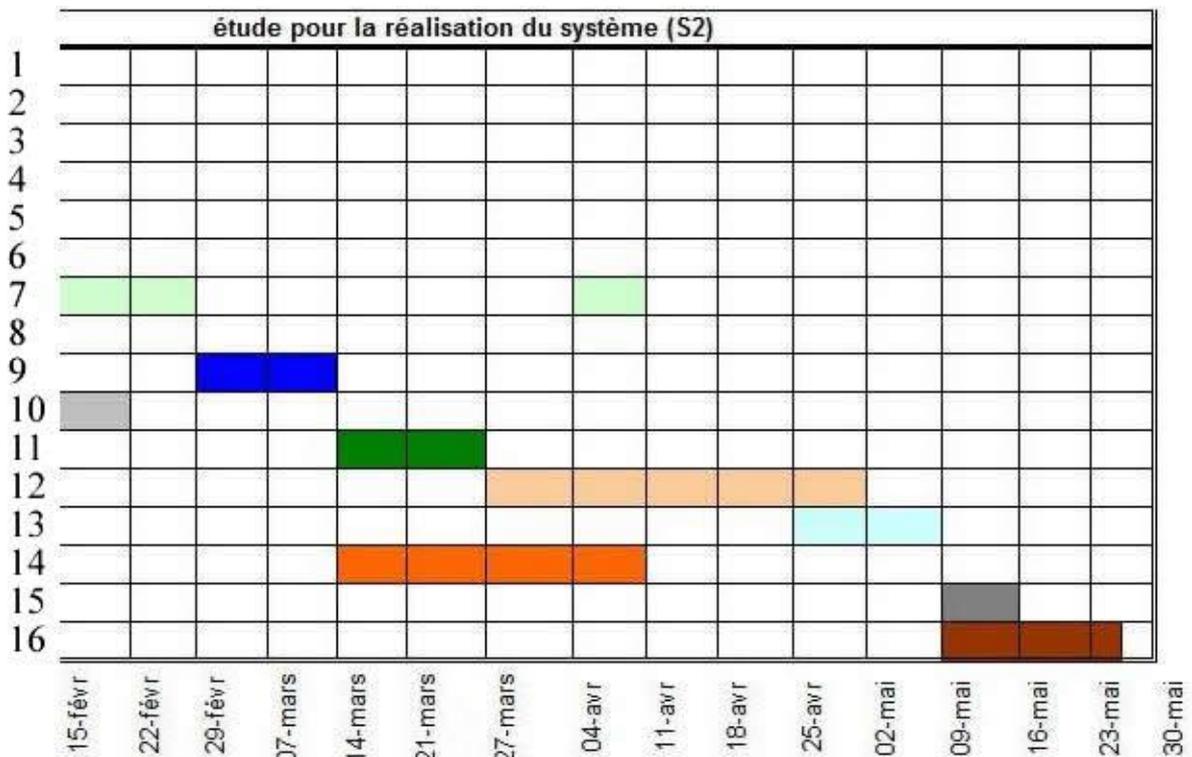
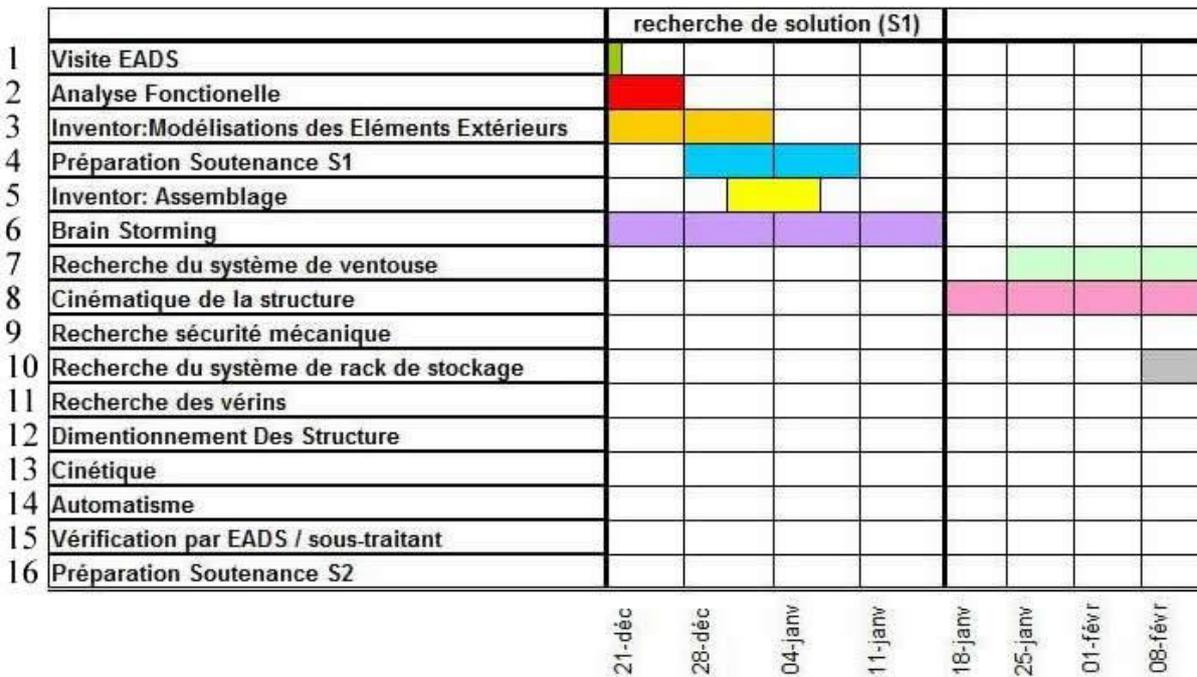


Séquence 3 : palonnier en fonctionnement.



1.2.2.7 Gantt réaliste

Notre Gantt prévisionnel initial n'étant pas toujours réalisable et adapté, nous l'avons modifié au fur et à mesure de notre avancement. Voici la synthèse du Gantt final (seul les grosses tâches sont répertoriés ici) :

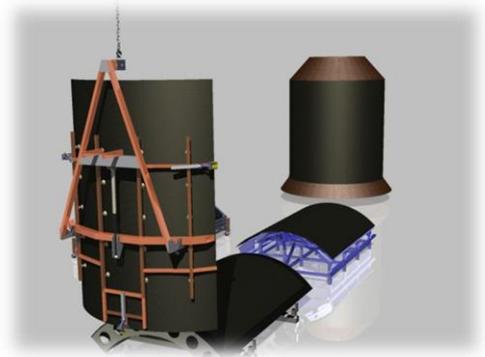


2 TRAVAUX EFFECTUES:

2.1 Modélisation CAO

2.1.1 Introduction

A l'aide principalement d'**Inventor**, mais également d'un minimum de **CATIA V5**, nous avons modélisé chacun des éléments extérieurs au palonnier pour l'introduire dans le contexte virtuellement et vérifier si tout le long de la conception du palonnier, celui-ci reste **adapté à son environnement**.

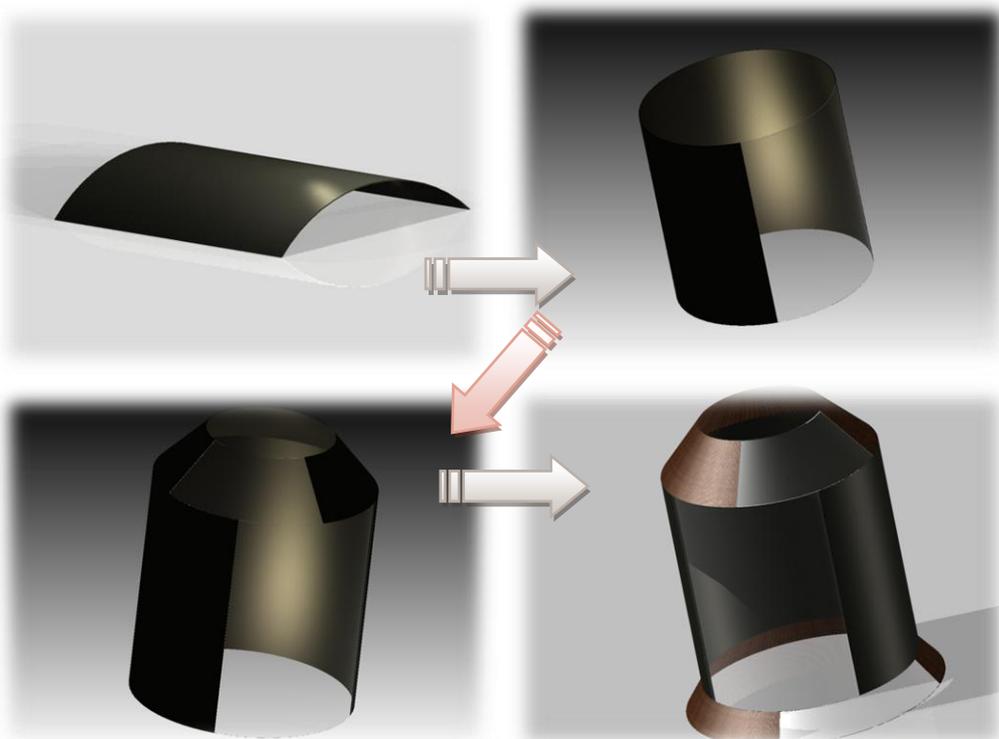


Pour dessiner chacun des outillages concernant le palonnier, nous avons dû effectuer une **visite du Site d'EADS des Mureaux** (plus particulièrement **l'Intégration du SYLDA** et la réalisation des panneaux) **en début d'année scolaire**. Nous avons tracés des croquis côtés pendant toute une journée.

La modélisation nous a également servis pour une étude de **dimensionnement des structures** (résistance des matériaux) (cf.2.7) et pour une étude **cinétique** (cf.2.8) afin de déterminer le **centre de gravité** et le placer au bon endroit (équilibrer le palonnier).

2.1.2 Panneau Sandwich/ SYLDA

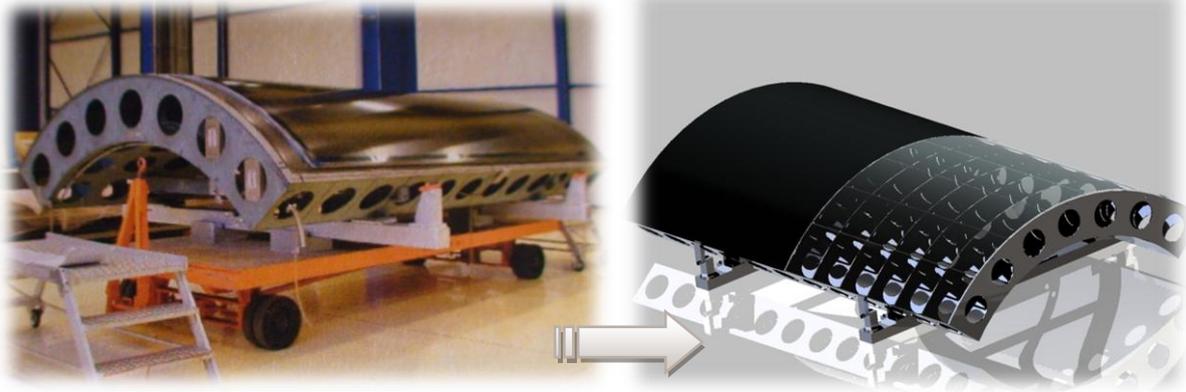
Il existe six modèles de panneaux ayant des tailles différentes non négligeables (cf.1.2.1.4), et donc à prendre en compte lors de la conception du palonnier.



Trois panneaux assemblés forment **la virole du SYLDA** (le dernier dessin montre sa forme générale).

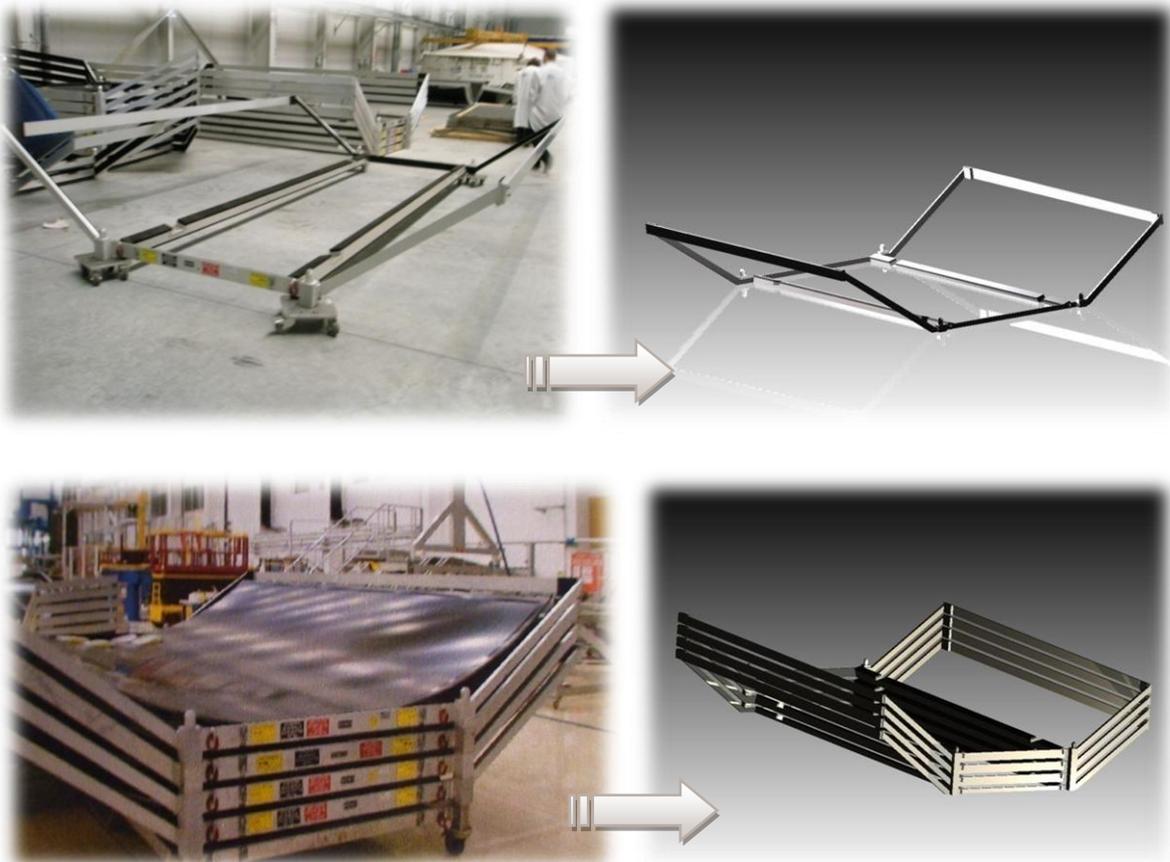
2.1.3 Moule d'autoclave

Les panneaux sandwich prennent forme sur un outillage de moulage à la température de 180°C dans des autoclaves.



2.1.4 Rack de stockage des panneaux

Les panneaux entre chacune des étapes de leurs fabrications, sont stockés et transportés dans des racks de protection.



Les racks sont empilables afin de gagner de la place lors du stockage. Ils ont également un système de roulettes qui permet un déplacement manuel simplifié.

Par la suite, nous verrons que nous devons retourner ces racks de stockage et donc concevoir un nouveau système pour les déplacer (cf.2.5).

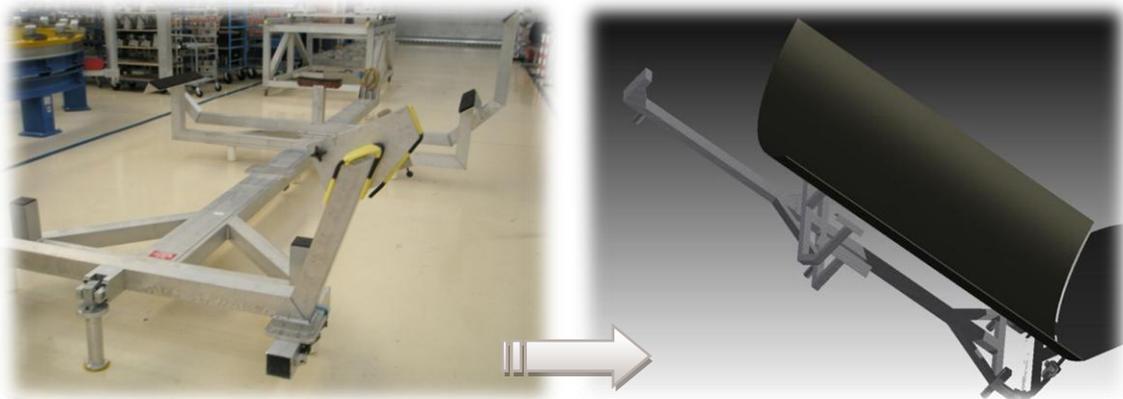
2.1.5 Bâti de détournage

Les panneaux, une fois démoulés, sont détournés sur un support à l'aide d'une détoureuse pneumatique manuellement.



2.1.6 Bâti de basculement

Afin de basculer le panneau à la verticale, EADS utilise un bâti de basculement accroché à un pont élévateur permettant l'accostage du panneau sur le pote d'intégration. Ce bâti disparaîtra après l'implantation du palonnier de manutention qui réalisera lui-même la tâche.



2.1.7 Autres

D'autres éléments n'ont pas été modélisés, comme le **système de pesée**, ou le **moyen CND** (Contrôle Non Destructif) par le fait qu'ils vont être rénovés pour l'intégration du palonnier.



Système de pesée



Moyen CND

2.2 Les ventouses

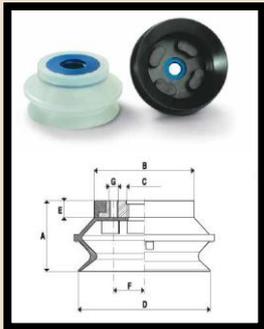
2.2.1 Recherche de cahier constructeur

Notre étude a commencé par la **recherche des ventouses** sur internet où nous avons trouvé plusieurs **fabricants**. Après l'étude de leur différent **cahier constructeurs**, nous avons appelé ces fabricants afin d'avoir d'amples informations et afin de nous guider sur le choix de ces ventouses.

Voici les critères importants :

- **Surface cylindrique** (prendre en compte la flèche).
- Charge à soulever de **60Kg** avec un coefficient de sécurité demandé de 10, ce qui nous fait 600Kg à supporter.
- Manipulation d'une matière délicate : **fibre de carbone**.
- **Charge horizontale et verticale** (la ventouse ne doit pas lâcher lorsque l'on pivote le panneau).
- **Environnement d'atelier**.

En suivant ces critères, nous avons retenu principalement **trois types de ventouses** :

illustration	type	Fleche admissible	Force de levage*	constructeur
	Ventouse à soufflet et butées	De 22 à 48mm suivant le diamètre	horizontale : 111.93 à 45kg vertical: ± équivalente, mais avec une flexion du soufflet	 VUOTOTECNICA
	Ventouses plates concaves à butées	14,2mm au maximum	horizontale : 28.4 à 92.2kg vertical: 25 à 80kg	
	Ventouses plates à butées	6mm au maximum	horizontale : 11.93 à 45kg vertical: 25 à 80kg	

*variant en fonction du diamètre et de la pression.

Avec un **support ventouse** :

Liaison rotule (que nous avons conçue prête à être usinée dans l'atelier de l'IUT)

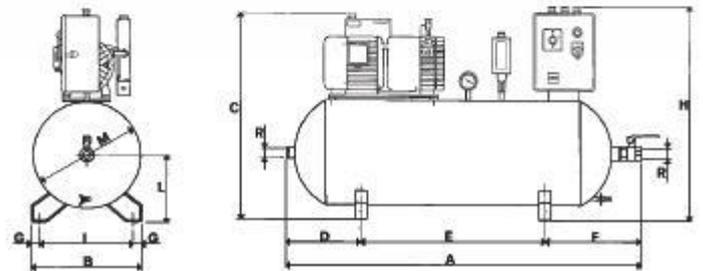
ou à ressort :



Et enfin le **générateur de vide** :

Soit chaque composant à acheter séparément

ou un groupe générateur de vide avec réserve:



2.2.2 Finalité

Après avoir effectué un **compromis** entre les **qualités** des différentes ventouses, nous avons choisis:

20 Ventouse FC 150 P

avec le système VGS*

et fixation pour mâle-mâle

VENTOUSES FC-P
FC150P

VACUUM GRIPPERS VGS™3010

VENTOUSES FIXATIONS
Fixations 150



*Le système VGS (cf.2.7) nous permettra de ne pas installer de générateur de vide (connexion directe avec le réseau d'air comprimé), ce qui supprime également le **système de support de ventouse** que nous avons élaboré (liaison rotule). Nous avons également choisi ce système pour sa **fiabilité** (beaucoup plus de sécurités) et sont **économie d'air** et de **place**. Ce système a en contrepartie, un coût plus élevé qu'une installation d'un générateur de vide.

Un filtre :

et les flexibles compatibles par le fabricant **LEGRIS**

ACCESSOIRES

Filtre d'aspiration



Nous avons pris des informations lors d'un déplacement pendant les vacances chez **un revendeur de PIAB (BFL)** à mantes, qui nous a également orientés sur notre choix et fourni les catalogues complets du constructeur.

2.2.3 Les tests

La société **spécialisée sur la technologie du vide, PIAB**, nous a fourni gratuitement un échantillon des produits que nous souhaitons utiliser afin d'effectuer des tests et de valider notre choix.



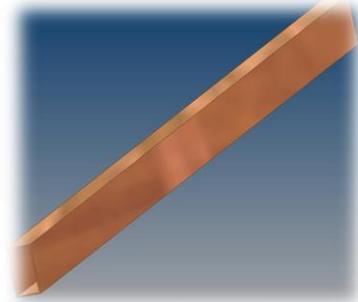
Après réception des produits et avec l'aide de **Mr BRUGEL (cf.4.1.3)** pour l'installation, nous avons effectué principalement **ces différents tests** :

- ✓ Traction de **90 kg en effort vertical**.
- ✓ Traction de **90 kg en effort transversal**.
- ✓ Vérification de **l'autonomie de préhension** de la ventouse sur un échantillon de panneau de carbone (fourni par EADS)
- ✓ Vérification de la **répartition des efforts** sur toute la surface de la ventouse (par transparence)
- ✓ Vérification en **basse et haute pression** du bon maintien et de la **non-détérioration** de l'échantillon de panneau sandwich

2.3 Structure du palonnier

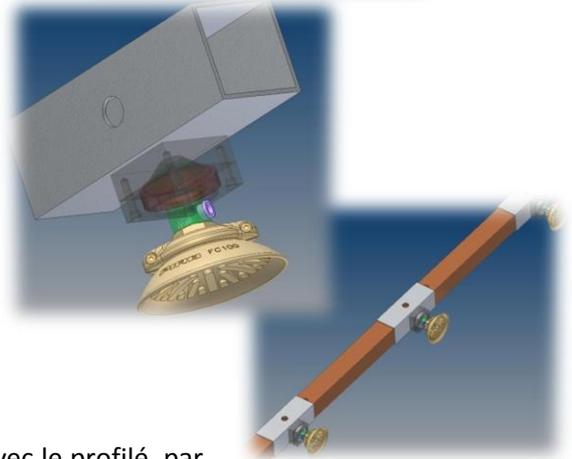
2.3.1 Type de profilé

Nous avons le choix entre plusieurs **types de profilé** pour constituer les barres de notre palonnier. Nous avons conclu que pour supporter tous les efforts mis en jeu, nous devons utiliser des **profilés en « U »**.



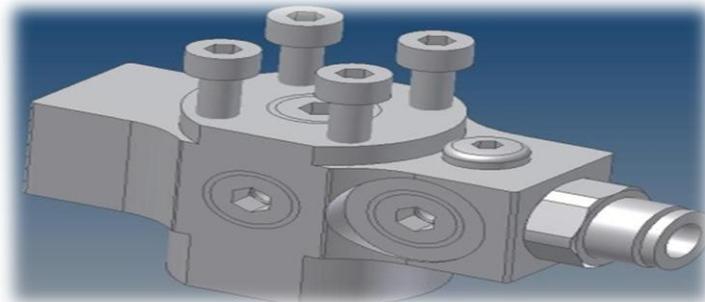
2.3.2 Support de ventouse

Nous avons conçu un **système de rotule** qui s'adapterait sur une **liaison glissière** avec le profilé et la ventouse. Cette rotule est usinable avec les outils mis à disposition dans l'atelier de l'IUT.



Mais le **système VGS** avec le type de ventouse que nous avons choisi rend ce système de rotule inutile.

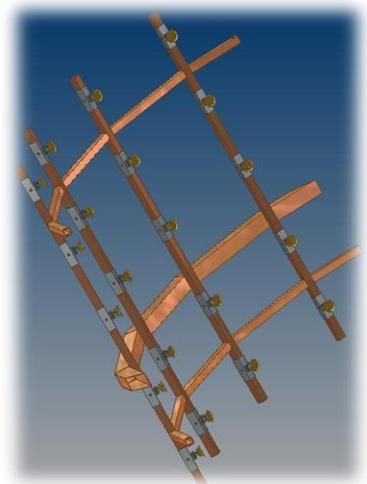
Nous gardons donc des ventouses bloquées par un axe avec le profilé, par l'intermédiaire du **système VGS** :



2.3.3 Structure en araignée

En fonction du rayon, de la flèche du panneau et en prenant compte des différentes hauteurs existantes, nous avons effectué une **structure araignée**, pour la partie mobile du palonnier : en assemblant quatre profilés munis des ventouses afin de correctement répartir les points d'attache avec le panneau. Nous installons en tout, vingt ventouses pour respecter le coefficient de sécurité de 10 (deux ventouses suffisent à maintenir le panneau).

Des **profilés intermédiaires** viennent soutenir la structure. Ces profilés (en orange) sont dimensionnés et coupés à un angle que nous avons calculé de façon à garder le bon rayon et la bonne flèche de l'arc de cercle.



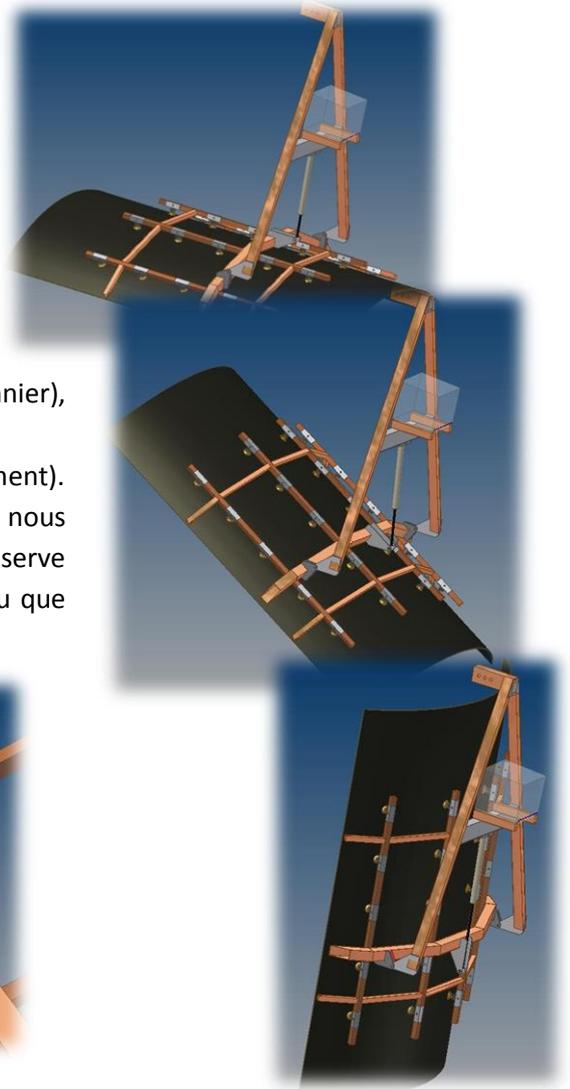
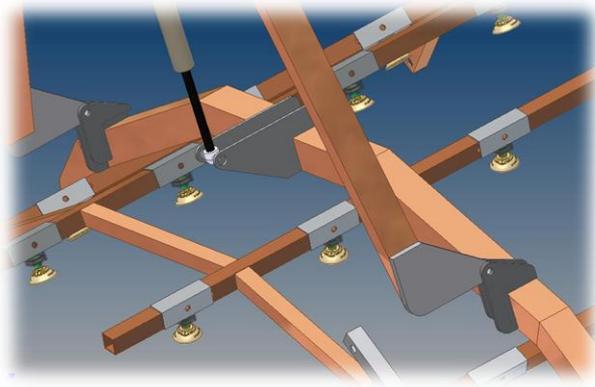
2.4 Cinématique

2.4.1 Mouvement de rotation

Nous avons trouvé plusieurs solutions différentes et en tous genres pour effectuer **la rotation du panneau**. Nous avons donc réuni toutes les idées et fait un choix.

Voici donc notre choix qui permet :

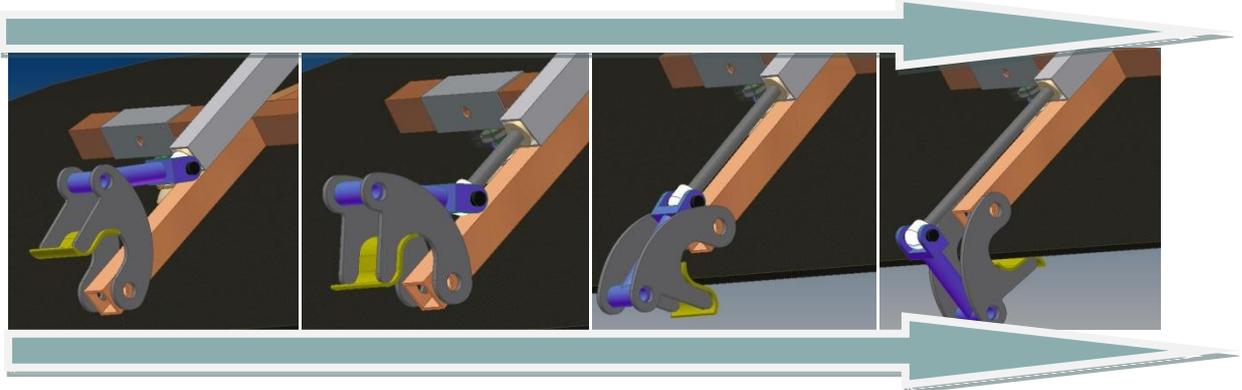
- ✓ Avoir un **maximum d'équilibre** (il est facile de garder le centre de gravité au même point lors du mouvement du palonnier), avec une **charge répartie symétriquement**.
- ✓ Un **montage simple** (un vérin et des liaisons pivots seulement).
- ✓ Une **possibilité d'installer le bloc de dépression d'air**, où nous pourrions même utiliser certain profilé de la structure comme réserve de vide afin de limiter une fois de plus le poids du palonnier (vu que nous utilisons le système VGS, ce bloc ne se posera pas).

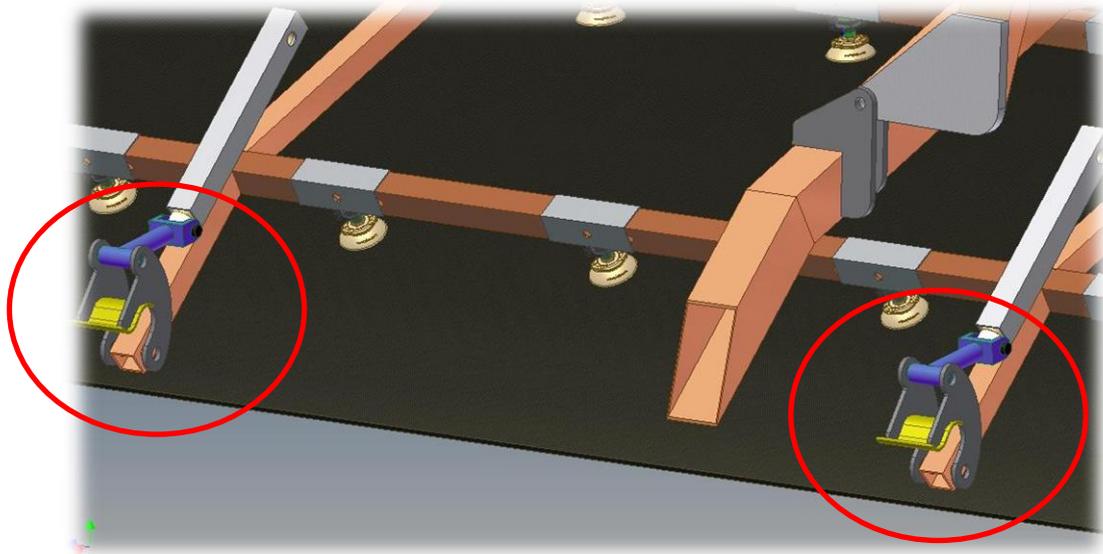


2.4.2 Sécurité Mécanique

Actuellement **les normes de sécurité**, demandent à tous systèmes des **sécurités mécaniques** en plus des autres sécurités (clapé anti retour, vérin simple effet, sécurité électrique...). Pour cela, nous avons étudié un système mécanique de sécurité qui permettra de soutenir le panneau en l'air malgré le **non fonctionnement des ventouses**.

Un système aux quatre coins du panneau (peut encore évoluer) et à l'extrémité inférieure vient se basculer afin d'effectuer cette sécurité. Elle se réalise à l'aide d'un vérin et d'une bielle.



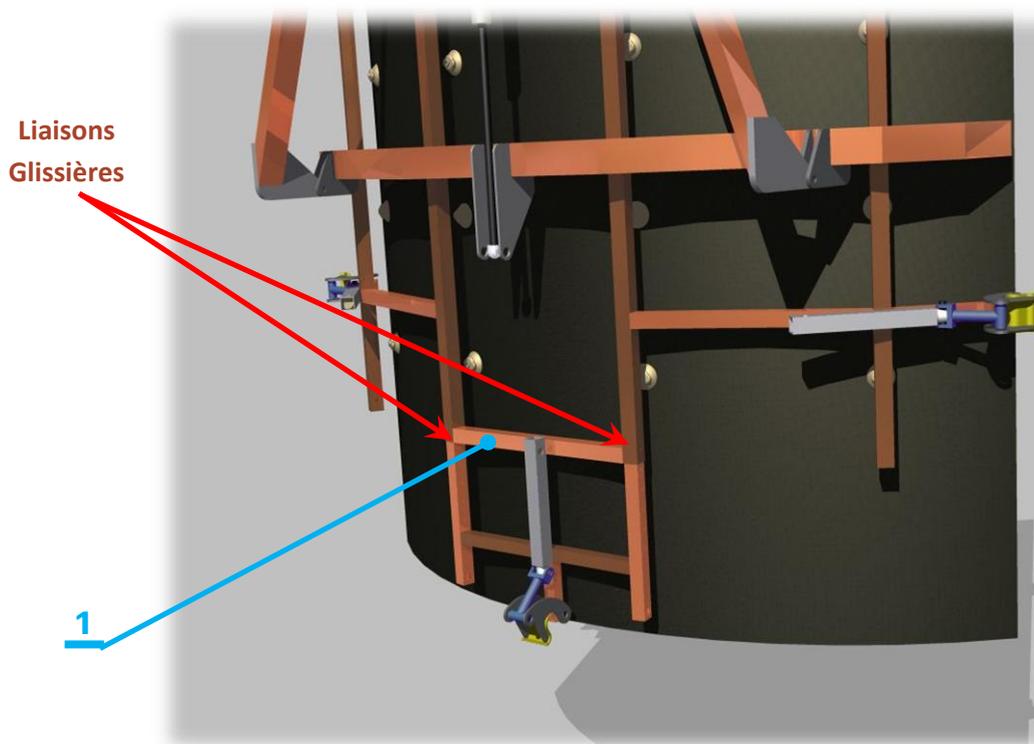


2.4.3 Réglage de longueur du palonnier

Afin de **répartir la charge** du panneau SYLDA sur le palonnier, nous avons conçu un système de **buté réglable** qui corrige l'erreur produite par les **6 différentes dimensions** de panneau (cf.1.2.1.4).

Le système est composé de **deux liaisons glissières**, avec un **MAP** (Maintien en Position) réalisé par deux axes en **6 positions données**. Les 6 positions correspondent aux 6 différents panneaux.

C'est un système **hyperstatique** de façon à augmenter **la stabilité et la rigidité** en MAP du panneau.

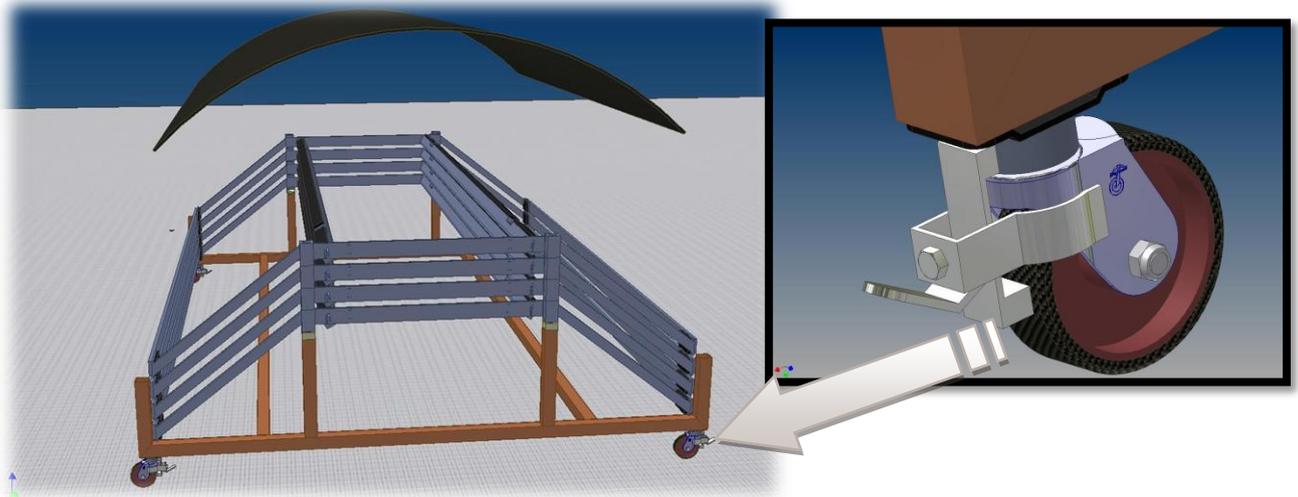


NB : le vérin de sécurité est en **liaison plan** (glisse) avec la barre « 1 ». (Ici: panneau le plus grand)

2.5 Nouveau chariot des racks de stockage

Comme expliqué précédemment, nous avons du **retourner les racks de stockage** pour effectuer, dans le bon sens, la préhension des panneaux par le palonnier. Du fait de ce changement de position, le système actuel de déplacement des **racks de stockages** doit être changé.

Nous avons alors trouvé cette **solution constructive**, qui permet de ne pas supprimer tous les racks de stockage, mais simplement de rajouter ce **chariot intermédiaire** sous le rack inférieur (à noter que les barres centrales des racks sont à dessouder afin de les remettre de niveau ; il faut également déplacer la mousse protectrice aux zones adéquates) :

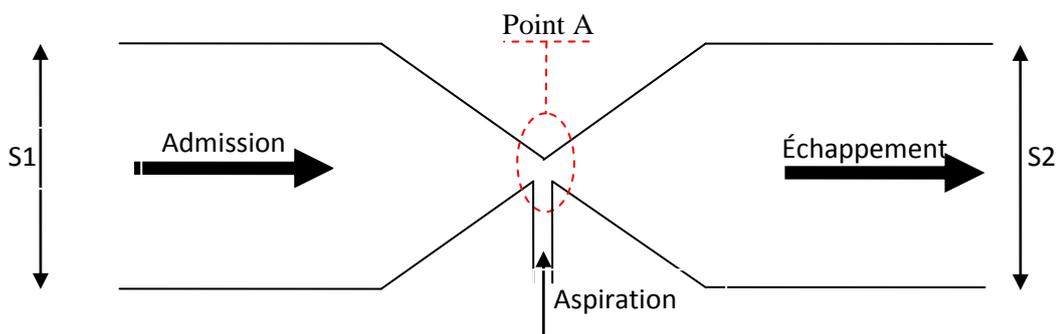


2.6 Principe de fonctionnement du système VGS

En supposons que l'air est un fluide incompressible non visqueux et de masse volumique donné.

✚ Le **théorème de Bernoulli** nous dit que :

Le fluide s'écoule en régime permanent dans une canalisation cylindrique de rayon R_1 et de **section S_1** suivie par un tube cylindrique de rayon R_2 et de **section S_2** . Le raccordement est fait par une **canalisation conique** assez longue pour que l'on reste en **régime laminaire** (régulier)



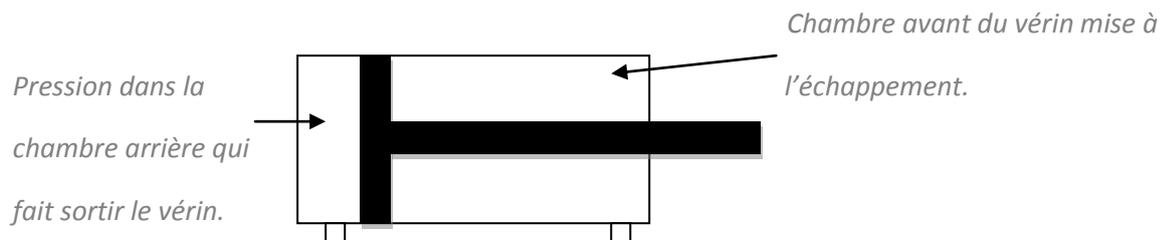
✚ Comme nous pouvons le voir sur ce schéma l'aire sous pression (5 bar) passe par la section S_1 vers la section S_2 en passant par le point A.

✚ L'air passant de S_1 vers S_2 par le point A crée **une dépressurisation** en ce point, cette dépression crée une **aspiration** grâce à une très basse pression, tout cela explique l'effet **VENTURI** (du nom de l'italien « Giovanni Battista Venturi » qui a découvert cet effet).

2.7 Les vérins

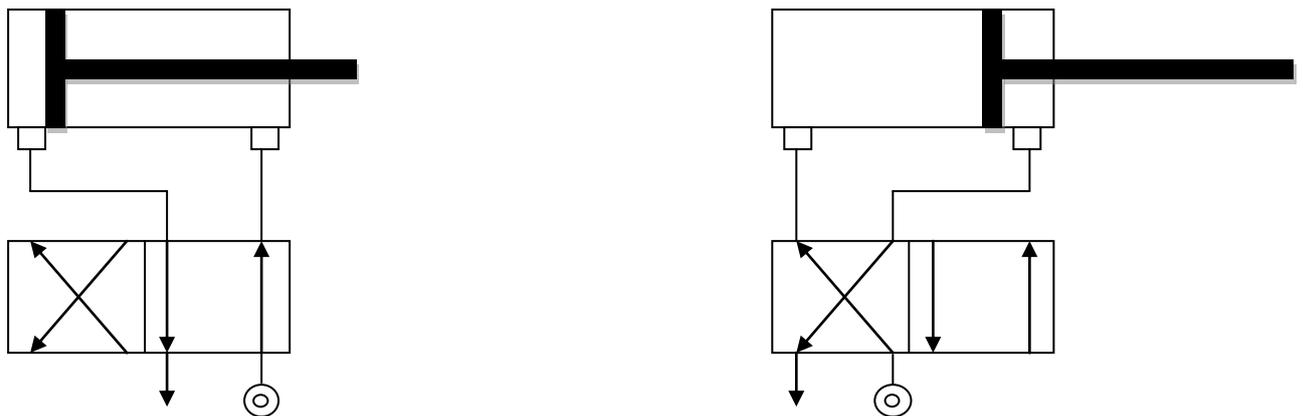
Le vérin doit permettre **de redresser le panneau** dans sa position haute.

Dans notre cas, un **vérin double effet** serait le plus judicieux à utiliser car on pourrait maîtriser entièrement le déplacement dans les 2 sens.



Sur le vérin double effet, la pression et l'échappement peuvent être inversés, cela permet de modifier le mouvement et donc de **rentrer le vérin ou de le sortir de façon précise et contrôlée**.

Pour le vérin double effet au niveau de l'alimentation, il nous faut un **distributeur 4/2** et pour une question de **sécurité**, les distributeurs seront **bistables** (deux commandes) : s'il y a une coupure de courant, le vérin restera en position (contrairement au distributeur monostable).



✚ Nous avons le poids du panneau qui est d'environ **60kg** (il faudra ajouter le poids du palonnier d'environ **100kg**) donc nous pouvons déjà en déduire la force qu'il faudra développer par la formule **F=p.S**

Calcul de la force P exercé par le poids de l'ensemble :

P=masse.g

g=9,81

1bar=1daN :cm²

P = (Ppanneau + Ppalonnier_{mobile}) x g = (60 +100) x 9,81= 1569.6N = 156.96daN

Sachant que la pression minimal est de **5 bars** chez **EADS**, nous pouvons en déduire **S** (surface du piston du vérin) et sachant aussi que **F** la force devant être exercé par le vérin doit être supérieure à **156.96daN** nous prendrons **F≅160daN** avec un **coefficient de sécurité de 3**, ce qui nous donne :

F = 160 x 3 = 480daN

$$S = \frac{F}{p} = \frac{480}{5} = 96 \text{ cm}^2$$

$$S = \frac{(\pi \times D^2)}{4}$$

$$D^2 = \frac{(4 \times S)}{\pi}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \times 96}{\pi}} \cong \mathbf{11.06 \text{ cm}}$$

Vérins normalisés DNC, système métrique



- Diamètre 32, 40, 50, 63, 80, 100, **125 mm**
- Course 10 ... 2 000 mm
- Force/Couple 483 ... 7 363 N
- Détection de position
- Amortissement fixe/réglable
- Filetage.

→ Configuration simple du produit

A partir de ce diamètre de piston, nous avons cherché chez le constructeur **FESTO** les vérins normalisés qui pourraient convenir. Ainsi à partir d'un diamètre normalisé de **125mm** nous pouvons avoir la longueur adéquate pour le **vérin double effet central**.

FESTO

✚ De la même façon que pour le vérin précédent, nous avons déterminé le diamètre des **vérins de sécurité latéraux**. Sachant que les trois vérins sont **identiques** et qu'ils devront pousser une **charge estimée à moins d'un kg**.

P= 1.9 ,81 = 9.81N ≅ 1daN

F = P x Coef_{secu} = 1 x 3 = 3daN

$$S = \frac{F}{p} = \frac{3}{5} = 0.6 \text{ cm}^2$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \times 0.6}{\pi}} \cong \mathbf{0.87 \text{ cm}}$$

Vérins normalisés DNG, système métrique



- Diamètre **32**, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 320 mm
- Course 10 ... 2 000 mm
- Force 483 ... 48 250 N
- Détection de position
- Amortissement réglable
- Filetage
- Tourillon.

A partir de ce diamètre de piston, nous avons cherché chez le constructeur **FESTO** les vérins normalisés qui pourraient convenir. Ainsi à partir d'un diamètre normalisé de **32mm** (qui correspond à la valeur minimal disponible chez FESTO) nous pouvons avoir la longueur adéquate pour les **vérins doubles effet de sécurité**.

FESTO

2.8 Dimensionnement Des Structures (DDS)

L'étude de la résistance des matériaux est un passage obligatoire pour la validation des projets surtout le notre !

2.8.1 Pourquoi ?

- Notre client a imposé un coefficient de sécurité non négligeable qui est de 10
- Le comportement de la structure du palonnier doit être capable de répondre positivement à toutes les contraintes extérieures ou intérieures.

Contraintes extérieures :

- Le poids de la charge (multiplié par le coefficient de sécurité).
- Les contraintes générées par les accélérations et les décélérations du palonnier lorsqu'il change de position (horizontal à vertical).
- Les contraintes générées par le pivotement horizontal.

Contraintes intérieures :

- La contrainte intérieure que subit le palonnier est engendrée par la masse et l'éloignement des extrémités du système par rapport au centre de gravité. Cette contrainte fait légèrement fléchir l'ensemble.

2.8.2 Les moyens d'améliorer le comportement à la résistance aux contraintes

Toutes les contraintes maximales à la traction, au fléchissement et au cisaillement ne nous ont pas été données par le cahier des charges. Il en va de même pour les dimensions des déformations admissibles. Nous pouvons alors choisir la forme et les propriétés métalliques du profilé utilisé.

Nous avons commencé par calculer la résistance du palonnier aux différents efforts manuellement ce qui nous a donné des calculs fastidieux (ANNEXES), après cela nous nous sommes rapprocher de Mr Akrache (professeur de DDS à l'IUT de saint Quentin en Yvelines : cf. 4.1.3) qui nous a aidé en nous présentant le logiciel RDM 6, qui nous a facilité les choses.

Parti de là, nous avons commencé par nous mettre d'accord sur la manière de procéder à la validation de nos essais.

Tout d'abord, nous avons commencé par déterminer un intervalle de tolérance pour les déformations admissibles à la flexion qui est de 10 mm (les ventouses permettent une déformation maximale de 8 mm). A partir de là, nous avons déterminé la nature du métal à utiliser (module d'Young « E »), et la forme du profilé utilisé (moment quadratique « I »).

Nous avons aussi assimilé l'action de la charge par les ventouses sur l'une des barres à une charge répartie sur toute la longueur. Hypothèse admissible car l'espacement entre les ventouses est petit et surtout constant.

Pour trouver l'amplitude de la charge répartie il suffit de diviser le quart du poids de la charge par la longueur d'une barre ce qui nous donne : $(1500 \text{ N} / 3000 \text{ mm} = 0,5 \text{ N} / \text{mm})$

Remarque : nous avons étudié un échantillon du palonnier pour simplifier les calculs.

(Cet échantillon est une des barres des quatre composant le palonnier).

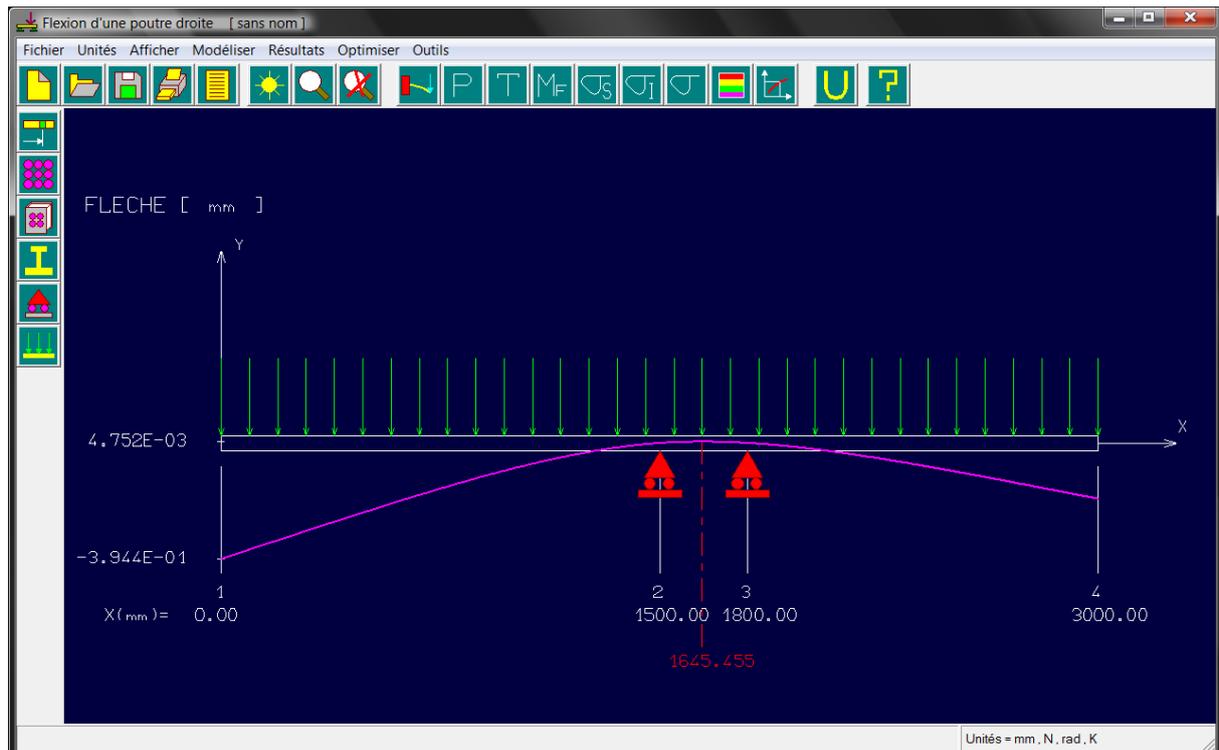
2.8.3 Flexion

En utilisant le logiciel RDM 6 nous avons obtenu pour ce qui est de la flexion les résultats suivant avec les différents métaux et les différentes sections du profilé comme suit :

2.8.3.1 Structures en acier

Structures en acier $E=220000\text{MPa}$, $\rho_{\text{Masse Volumique}} = 7850\text{kg/m}^3$:

a. Section carrée de 100 mm de coté et 10mm d'épaisseur :

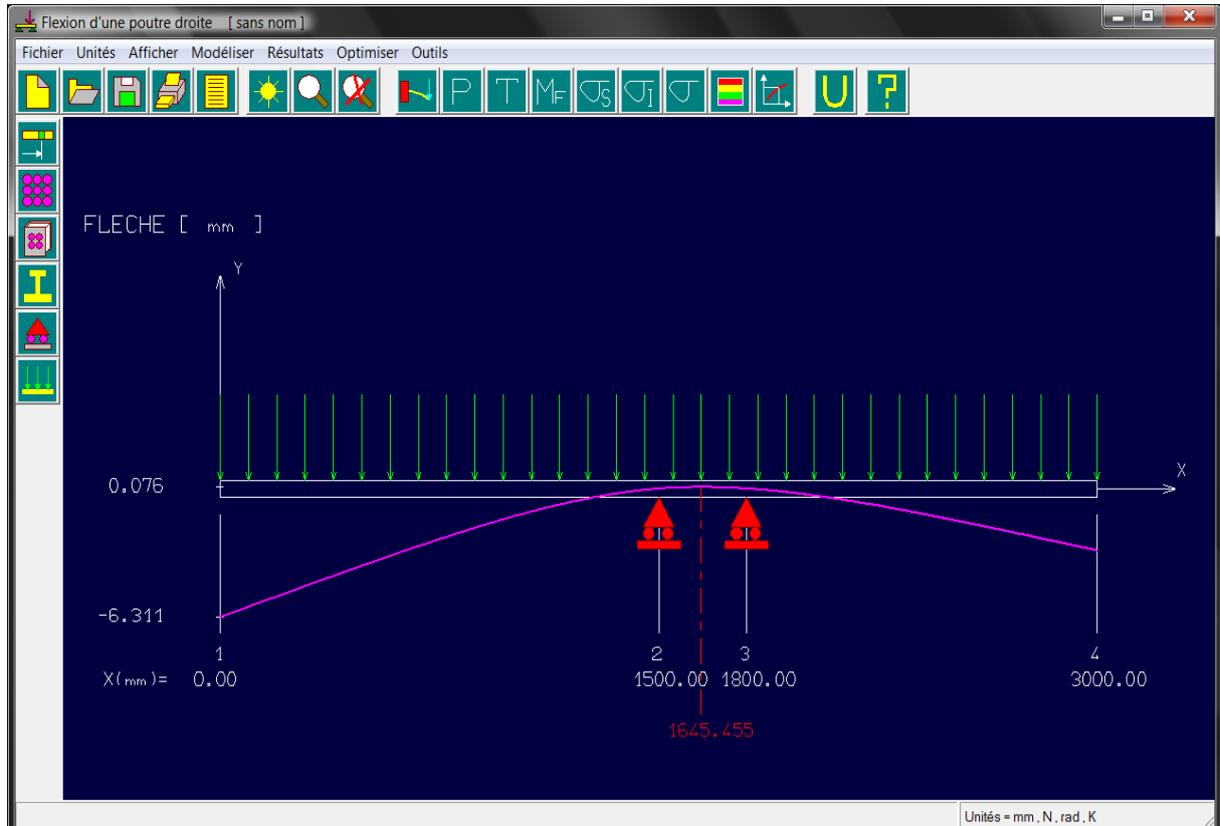


Nous pouvons voir sur cette copie de simulation la déformation maximale qui est de $(3.944 \times 10^{-1} \text{ mm} + 4.75 \times 10^{-1} \text{ mm}) = 0,9 \text{ mm}$.

Remarque :

- Les deux appuis correspondent aux liaisons pivot et au point d'appui du vérin
- Le poids de cette barre peut être calculé comme suit :
 $(S_{\text{Section}} \times L_{\text{Longueur}} \times \rho_{\text{Masse Volumique}})$ ce qui nous donne :
 $((0,1^2 - 0,08^2) \times 3 \times 7850) = 84,78 \text{ kg}$
- Rapporté à l'ensemble cela nous donne une idée du poids de la structure qui sera de :
 $84,87 \times 4 = 339,12 \text{ kg}$
- Ce poids est trop important et risque de poser d'autres problèmes comme le
 - dimensionnement du vérin de basculement.
 - le calcul du diamètre de l'axe de la liaison pivot.
 - Le coût de fabrication du palonnier.

b. Section carrée de 50 mm et de 5 mm d'épaisseur :

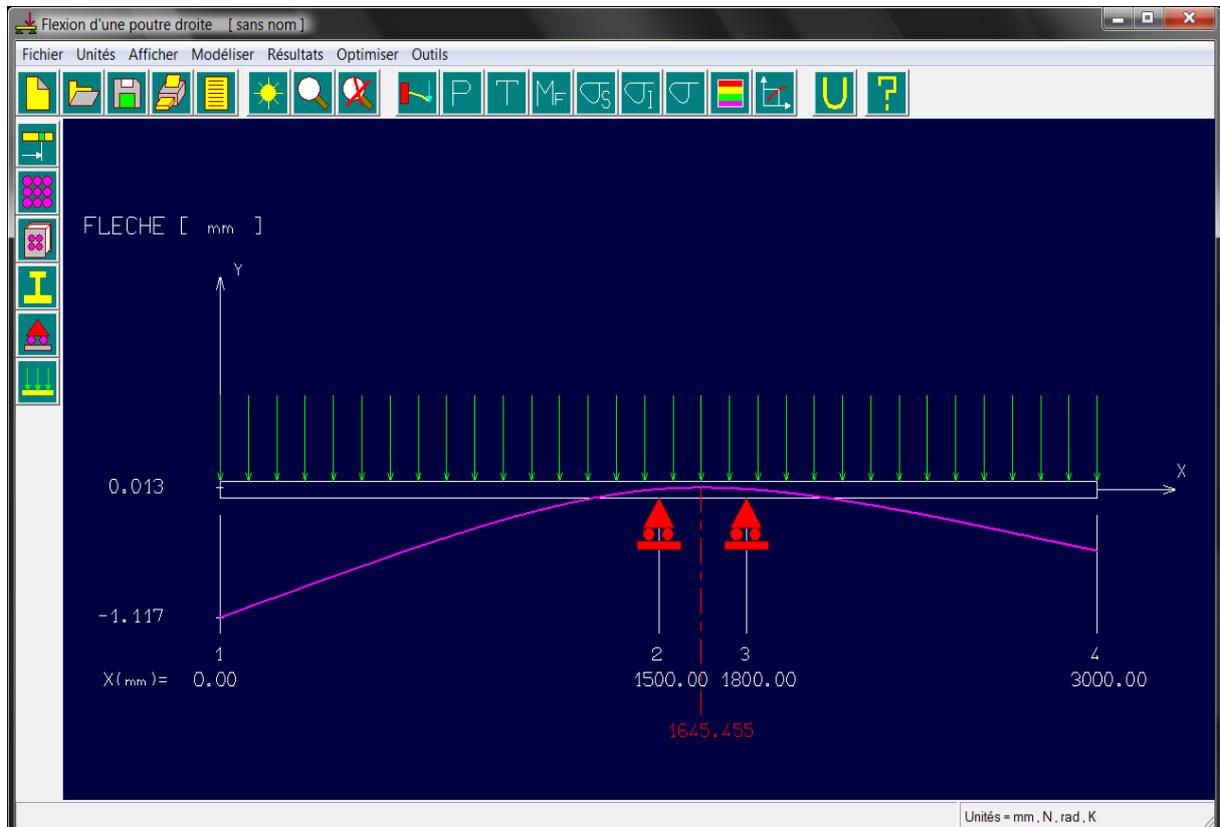


Sur cette copie de la simulation nous voyons la déformation maximale (à gauche) qui est de $(6.311\text{mm}+0.076\text{mm}) = 6,5\text{mm}$

Remarque :

- Le poids de cette barre peut être calculé comme suit :
(Section \times Longueur \times ϕ Masse Volumique.) Ce qui nous donne :
 $((0,05^2 - 0,04^2) \times 3 \times 7850) = 21,195 \text{ kg}$
- Rapporté a l'ensemble cela nous donne une idée du poids de la structure qui sera de :
 $21,195 \times 4 = 84,78 \text{ kg}$
- Ce poids représente le quart du poids du palonnier de la première simulation
- La déformé de 6,5 mm au bout du palonnier est admissible et ne représente pas un danger pour la prise des ventouses sur notre cylindre.

c. Section rectangulaire de 100mm x50mm et 5mm d'épaisseur :



Nous pouvons voir sur cette copie de la simulation la déformation maximale (à gauche) qui est de (1.11mm) ce qui est presque négligeable.

Remarque :

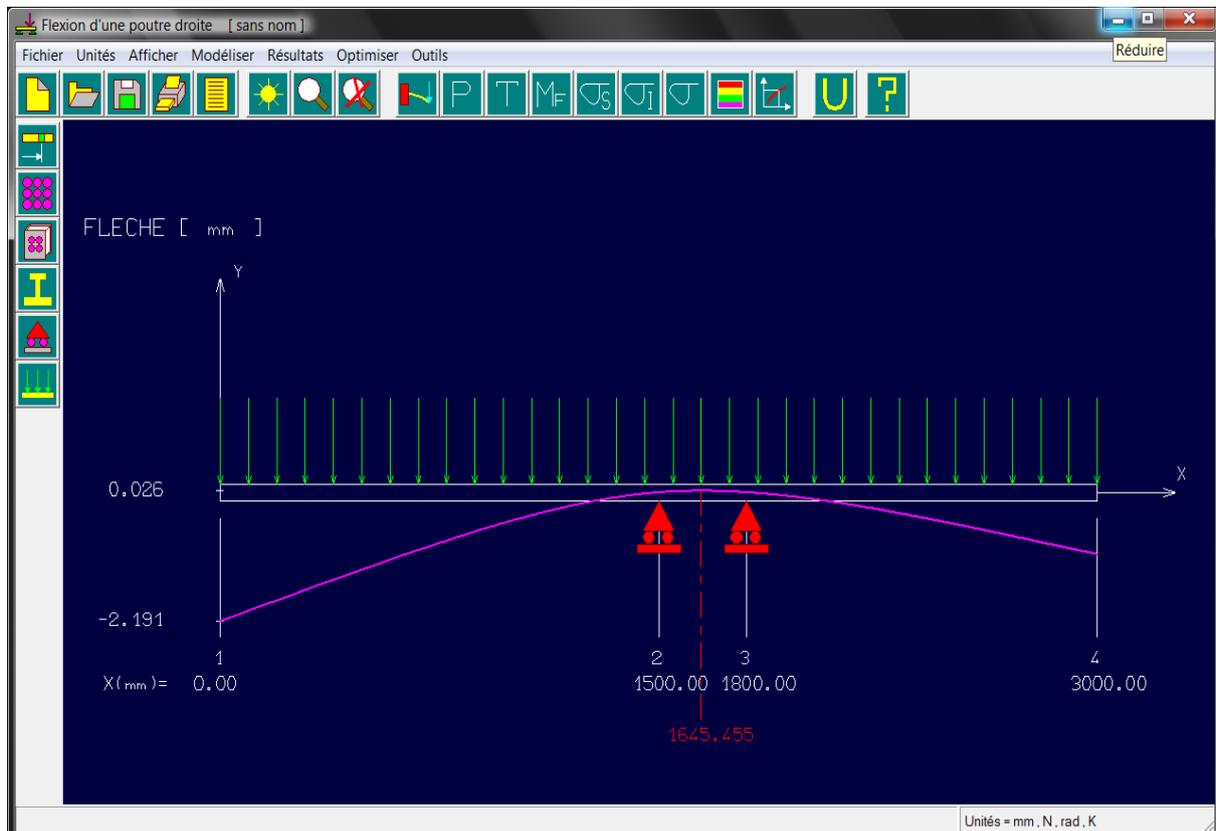
- Le poids de cette barre peut être calculé comme suit :
($S_{\text{section}} \times L_{\text{longueur}} \times \rho_{\text{Masse Volumique.}}$) Ce qui nous donne :
 $((0,1 \times 0,05) - (0,09 \times 0,04)) \times 3 \times 7850 = 32 \text{ kg}$
- Rapporté à l'ensemble cela nous donne une idée du poids de la structure qui sera de :
 $32 \times 4 = 132 \text{ kg}$
- La section rectangulaire est plus robuste et supporte mieux les efforts que la section carrée, de plus elle permet d'usiner des structures angulaires très facilement.
Par exemple :

Pour obtenir un angle de 90° il suffit de couper deux extrémités à 45° et de souder les deux parties.

2.8.3.2 Structures en aluminium

Structures en aluminium $E=67500 \text{ MPA}$, $\rho_{\text{Masse Volumique.}} = 2700 \text{ kg/m}^3$

- a. Section rectangulaire de 100mm×50mm et 10mm d'épaisseur :



Nous pouvons voir sur cette copie de la simulation la déformation maximale (à gauche) qui est de (2.3mm)

Remarque :

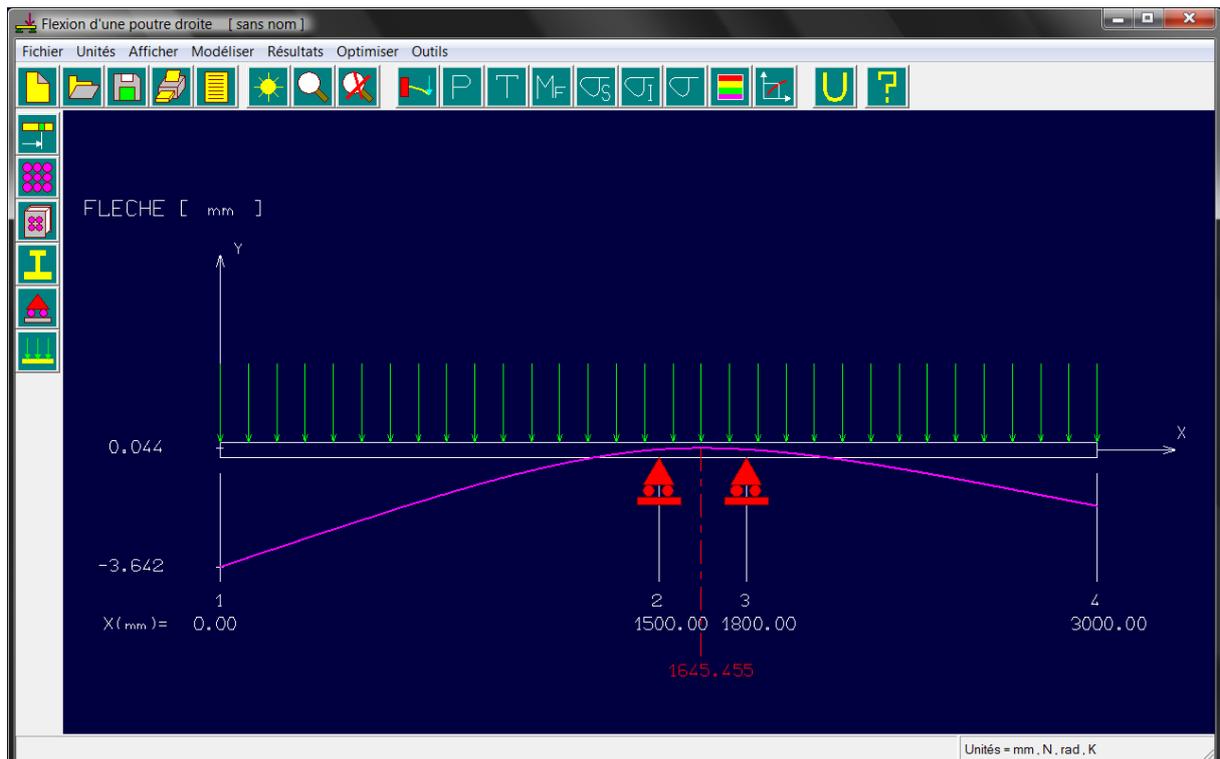
- Le poids de cette barre peut être calculé comme suit :
($S_{\text{section}} \times L_{\text{longueur}} \times \rho_{\text{Masse Volumique.}}$) Ce qui nous donne :

$$((0,1 \times 0,05) - (0,08 \times 0,03)) \times 3 \times 2700 = \boxed{21,06 \text{ kg}}$$

- Rapporté à l'ensemble cela nous donne une idée du poids de la structure qui sera de :

$$21,06 \times 4 = \boxed{84,24 \text{ kg}}$$

b. Section rectangulaire de 100mm×50mm et 5mm d'épaisseur :



Nous pouvons voir sur cette copie de la simulation la déformation maximale (à gauche) qui est de (3.68mm).

Remarque :

- Le poids de cette barre peut être calculé comme suit :
(Section × Longueur × ϕ Masse Volumique.) Ce qui nous donne :
 $((0,1 \times 0,05) - (0,09 \times 0,04)) \times 3 \times 2700 = 11,34 \text{ kg}$
- Rapporté à l'ensemble cela nous donne une idée du poids de la structure qui sera de :
 $21,06 \times 4 = 45,36 \text{ kg}$

CONCLUSION

En essayant de trouver un certain équilibre entre le poids de l'ensemble et la déformation maximale de la structure, nous pouvons d'ors et déjà opter pour une structure en **aluminium** de **section rectangulaire** de dimension (100mm×50mm) et de **10mm d'épaisseur** (soit une flèche de 3.68mm et une masse du système mobil de 45.36kg).

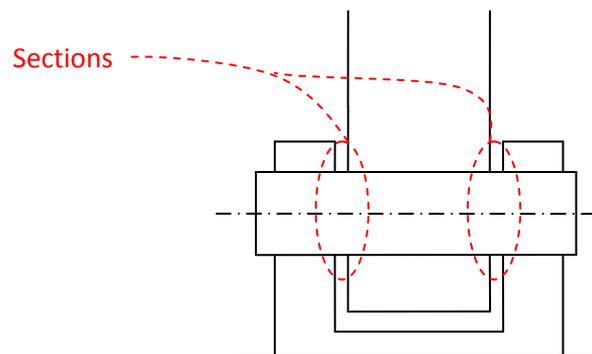
Cela nous permettra le dimensionnement du vérin et du diamètre de l'arbre de la liaison pivot : pour cela il nous faut établir une étude de cisaillement sur cette liaison pivot (cf. 2.9.4).

2.8.4 Cisaillement

L'arbre formant la liaison pivot est soumis à des contraintes de cisaillement produites par le poids de la structure mobile du palonnier, du poids du panneau, et du poids des ventouses (négligeable).

Le matériau de cet arbre sera en acier donc avec un module d'Young $E=220000$ MPA et une limite d'élasticité de $\sigma_E= 300$ MPA, nous nous baserons sur les calculs suivants :

Les contraintes de cisaillement sont divisées /4, (2sections x deux liaisons pivots) ce qui allège le poids de la liaison



C_s : est le coefficient de sécurité

$$\frac{\sigma_E}{C_s} = \sigma_{max} \quad \sigma_{max} = \frac{300}{10} = 30 \text{ MPA}$$

$$\sigma_{max} = \frac{F}{4 \times S}$$

$F =$ poids de la structure + poids du panneau
 $F = 10000\text{N} + 6000\text{N}$
 $F = 16000\text{N}$

$$\sigma_{max} = \frac{F}{\frac{4 \times (\pi \times D^2)}{4}}$$

Nous déduisons de ce calcul un diamètre de $\phi 13 \text{ mm}$.

$$\sigma_{max} = \frac{F}{\pi \times D^2}$$

$$D = \sqrt{\frac{F}{\sigma_{max} \times \pi}} \quad D = \sqrt{\frac{16000}{30 \times \pi}} \quad D = 13 \text{ mm}$$

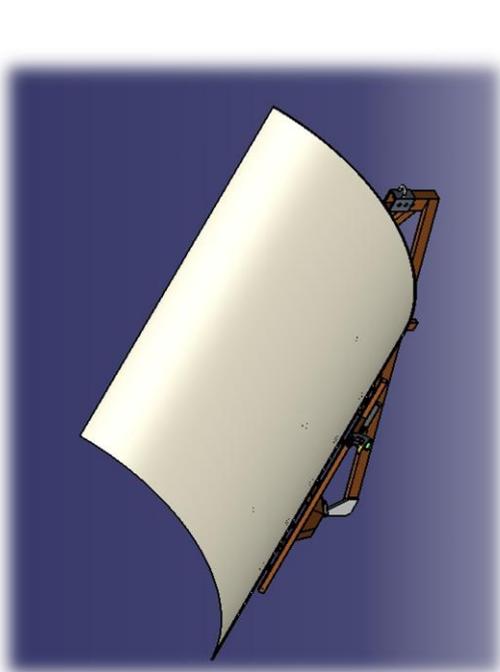
➤ Si nous voulons déduire le dimensionnement de l'arbre de l'axe de cette liaison il faut :

- soit fixer la contrainte max admissible (σ_{max}) et en déduire le rayon de l'arbre (R),
- soit le contraire (fixer le rayon (R) et en déduire la contrainte max admissible).

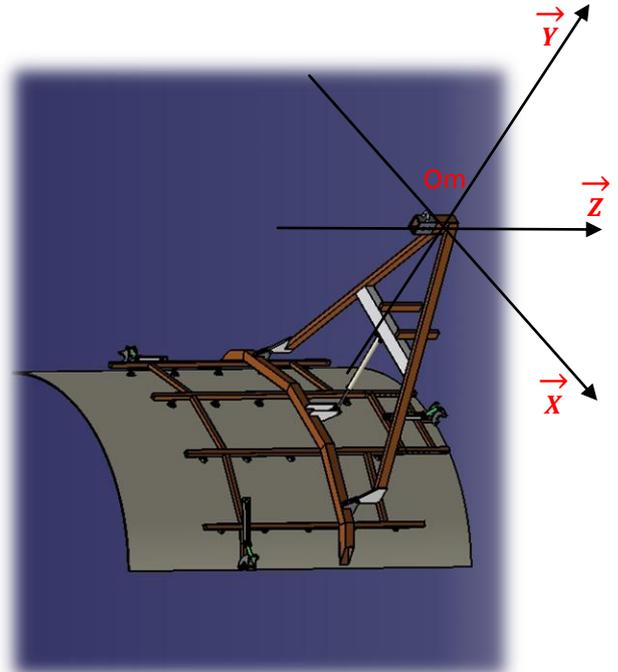
2.9 Cinétique, Centre de Gravité, équilibre...

2.9.1 Situation

Notre palonnier va travailler selon **deux positions extrêmes** (cf. ci-dessous). Le problème étant de déterminer la position du **centre de gravité**, et de placer ce dernier de façon à garder le **système en équilibre** lors de son **mouvement**.



Position verticale



Position baissée

Pour maintenir le système en équilibre entre les deux positions **horizontale** et **verticale** demandées, nous devons imposer le **déplacement du centre de gravité suivant l'axe Y** (verticale) et ainsi **le bloquer sur les autres axes** (cf.2.10.5).

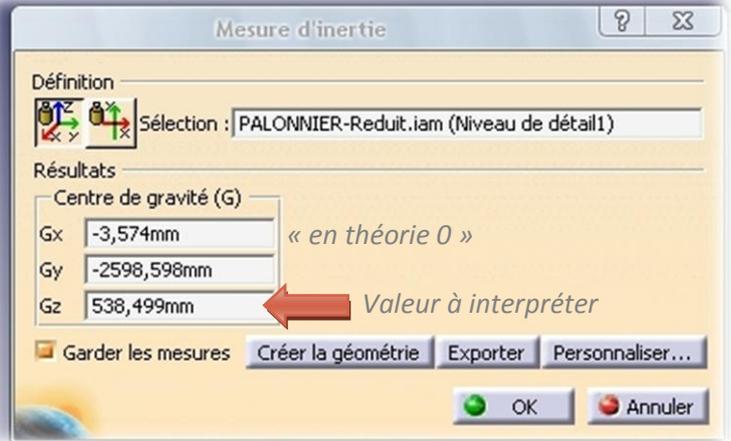
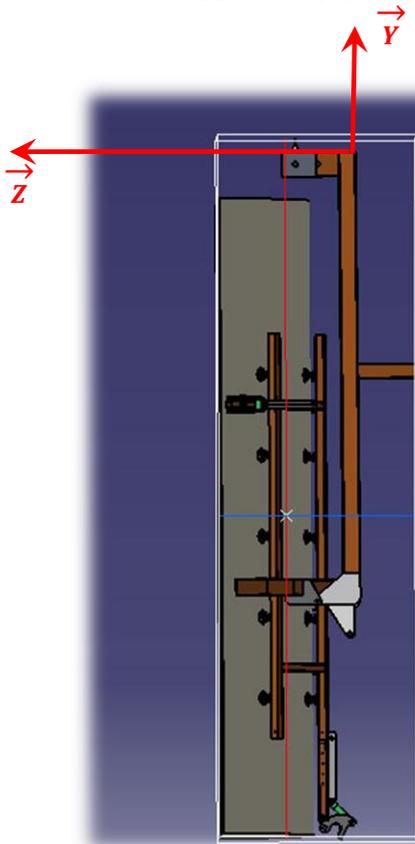
Or, dans notre cas on constate que les centres de gravités ne sont pas situés au même endroit sur notre palonnier, suivant les deux positions extrêmes (problème sur **l'axe Z**).

Notre niveau dans le domaine de la **cinétique** et la complexité du problème, nous a bloqués pour effectuer une **résolution théorique manuscrite**. Nous avons donc préféré pencher sur une **méthode avec logiciel**.

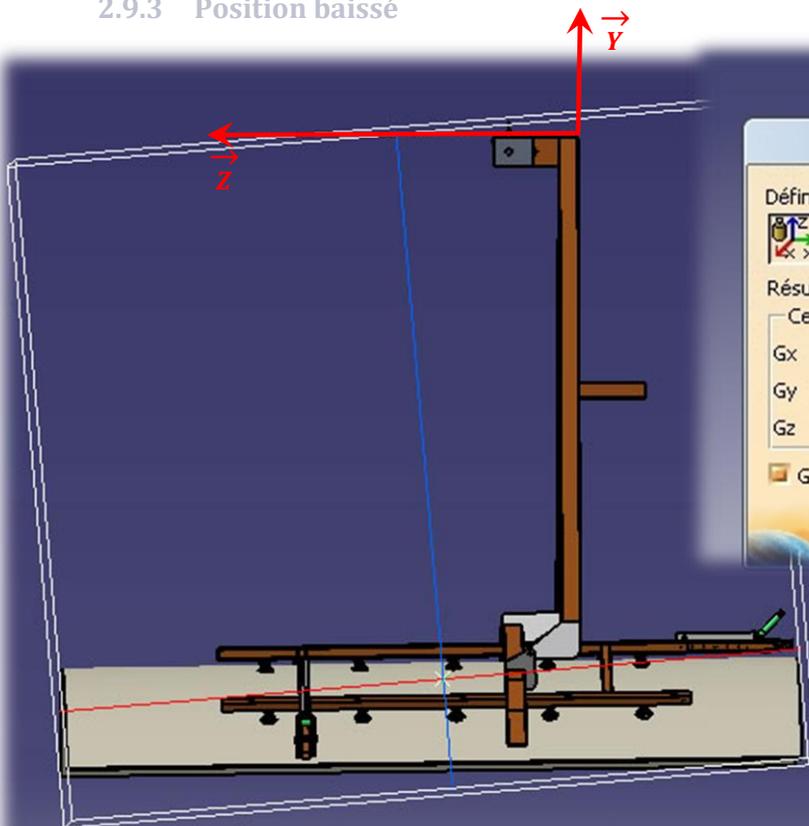
Nous avons recherché en vain une solution sur le logiciel de **Conception Assisté par Ordinateur** que nous utilisons (**Inventor**). Nous avons alors converti l'assemblage du palonnier en un **format normalisé** appelé **STEP** (*.stp) qui permet le **transfert** de données vers plusieurs autres logiciels.

Nous avons eu la possibilité de réaliser les tests sur **Solidworks**, mais cherchant à apprendre en avance **CATIA V5**, nous avons préféré effectuer le transfert sur ce dernier logiciel de CAO (cf. page suivante).

2.9.2 Position verticale

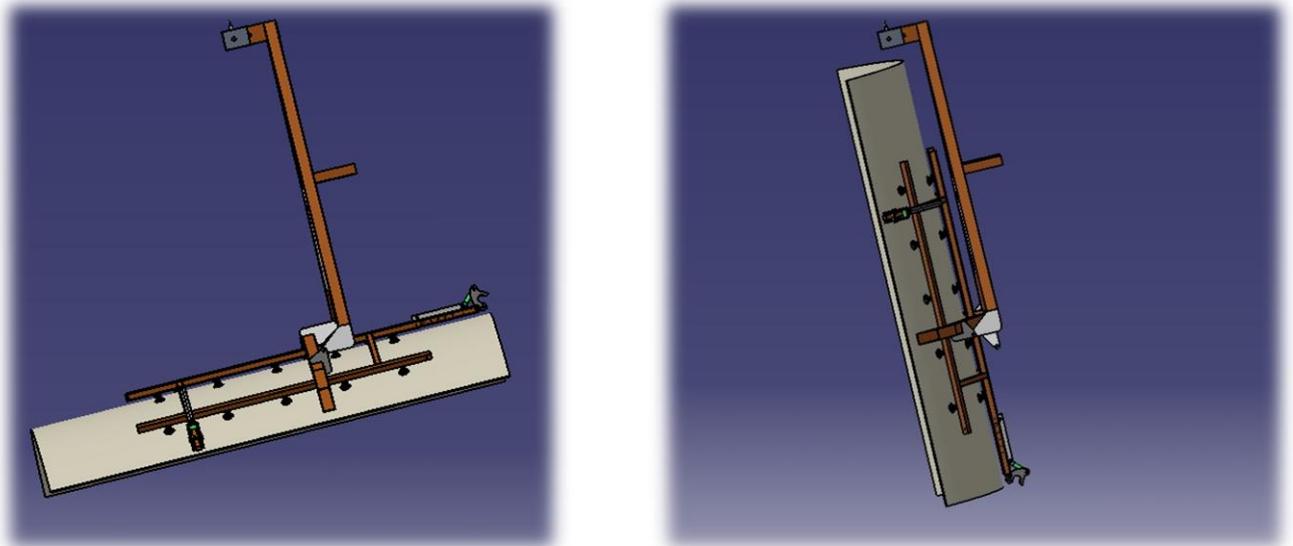


2.9.3 Position baissé



2.9.4 Résultat : un déséquilibre

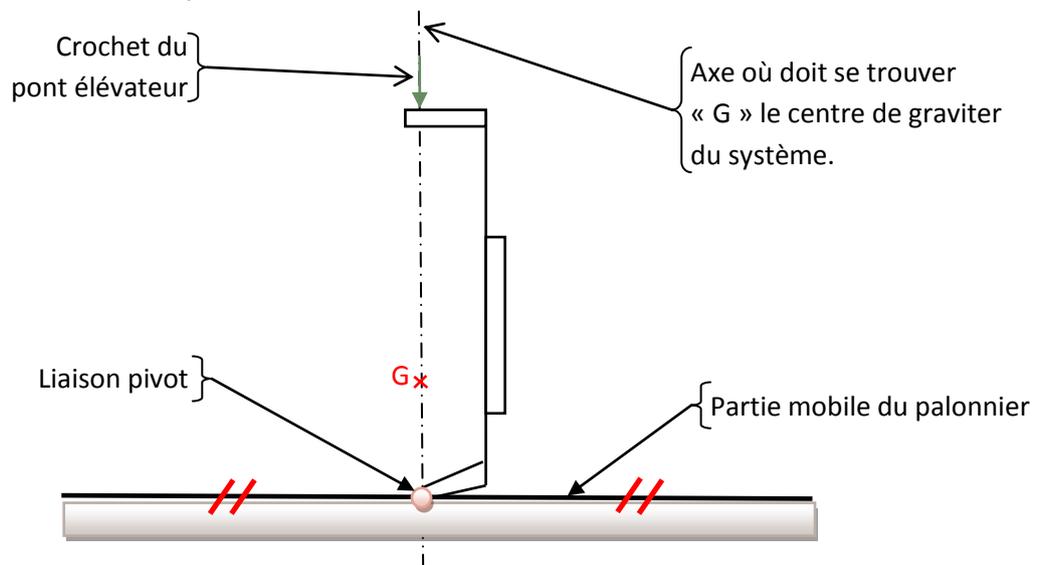
Nous pouvons constater sur les deux schémas qui suivent que si le centre de gravité n'est pas « bien » placé cela provoque **un déséquilibré** et **penche le palonnier**.



Dans cette position il est très dur (voir **impossible d'utiliser le palonnier**) de manière optimum (**mauvaise Mise en Position du panneau**).

2.9.5 Solution

La solution pour remédier à ce problème est de **remettre du poids du côté droit** afin de les-ter le système selon les axes qui nous posent problème (**l'axe « z »**). Un déplacement de la partie mobile du palonnier vers la droite (de façon à **répartir la masse au niveau de la liaison pivot**) permettra de limiter d'alourdir le palonnier



En conclusion on peut retenir que lors de **la conception du palonnier** il faudra faire extrêmement attention au **centre de gravité**, et prévoir des **masses d'équilibrage** pour un réglage fin, lors des premiers essais avec un panneau SYLDA.

2.10 Automatismes

2.10.1 Introduction des variables / Automgen

Afin de commander le palonnier, nous avons effectué une **étude d'automatisation** du système. Cette automatisation est l'étape qui permet la **communication** entre le pupitre (la **partie commande**) et le palonnier (la **partie opérative**).

L'étude porte sur la **programmation** et le **câblage** d'un **automate**. La première étape a été de recenser toutes **les entrées** (boutons, capteurs, contacteurs...) et toutes **les sorties** (vérins, moteurs, distributeurs...). Une fois tout déterminé, nous leur avons affecté un acronyme (**symboles**) et un nom d'entrée ou de sortie (**Variables**) (cf. le tableau bleu ci-après).

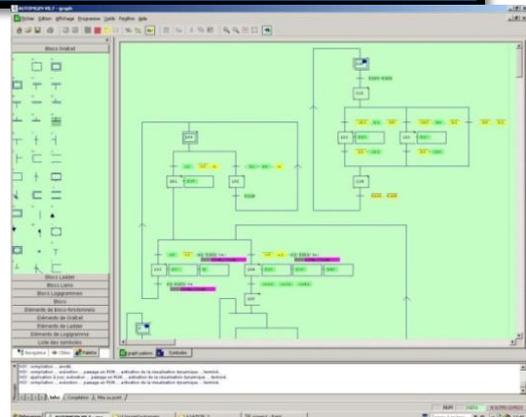


Exemple d'automate

Les variables commençant par un « i » sont des **entrées (input)**, contrairement aux variables commençant par un « o » qui sont des **sorties (output)**

Symboles	Variables	Commentaires
cb1	i0	Capteur de sortie du vérin central
cb0	i1	Capteur d'entrée du vérin central
ce21	i2	Capteur de sortie du vérin de sécurité n°1
ce20	i3	Capteur d'entrée du vérin de sécurité n°1
ce31	i4	Capteur de sortie du vérin de sécurité n°2
ce30	i5	Capteur d'entrée du vérin de sécurité n°2
ce41	i6	Capteur de sortie du vérin de sécurité n°3
ce40	i7	Capteur d'entrée du vérin de sécurité n°3
m	i8	Bouton "marche" du pupitre de commande
v1	i10	Bouton de commande: aspiration des ventouses
v0	i11	Bouton de commande: relâchement des ventouses
b1	i12	Bouton de commande: sortie du vérin central
b0	i13	Bouton de commande: entrée du vérin central
e1	i14	Bouton de commande: sortie des vérins de sécurité
e0	i15	Bouton de commande: entrée des vérins de sécurité
ka2	i16	Contact du relai servant à l'arrêt d'urgence
D1+	o0	Distributeur D1: sortie du vérin central
D1-	o1	Distributeur D1: entrée du vérin central
D2+	o2	Distributeur D2: sortie du vérin de sécurité n°1
D2-	o3	Distributeur D2: entrée du vérin de sécurité n°1
D3+	o4	Distributeur D3: sortie du vérin de sécurité n°2
D3-	o5	Distributeur D3: entrée du vérin de sécurité n°2
D4+	o6	Distributeur D4: sortie du vérin de sécurité n°3
D4-	o7	Distributeur D4: entrée du vérin de sécurité n°3
D5+	o8	Distributeur D5: envoi d'air dans le système VGS (aspiration des ventouses)
D5-	o9	Distributeur D5: arrêt d'envoi d'air dans le système VGS
R	o10	Contact donnant l'ordre au système VGS de relâcher l'accroche des ventouses

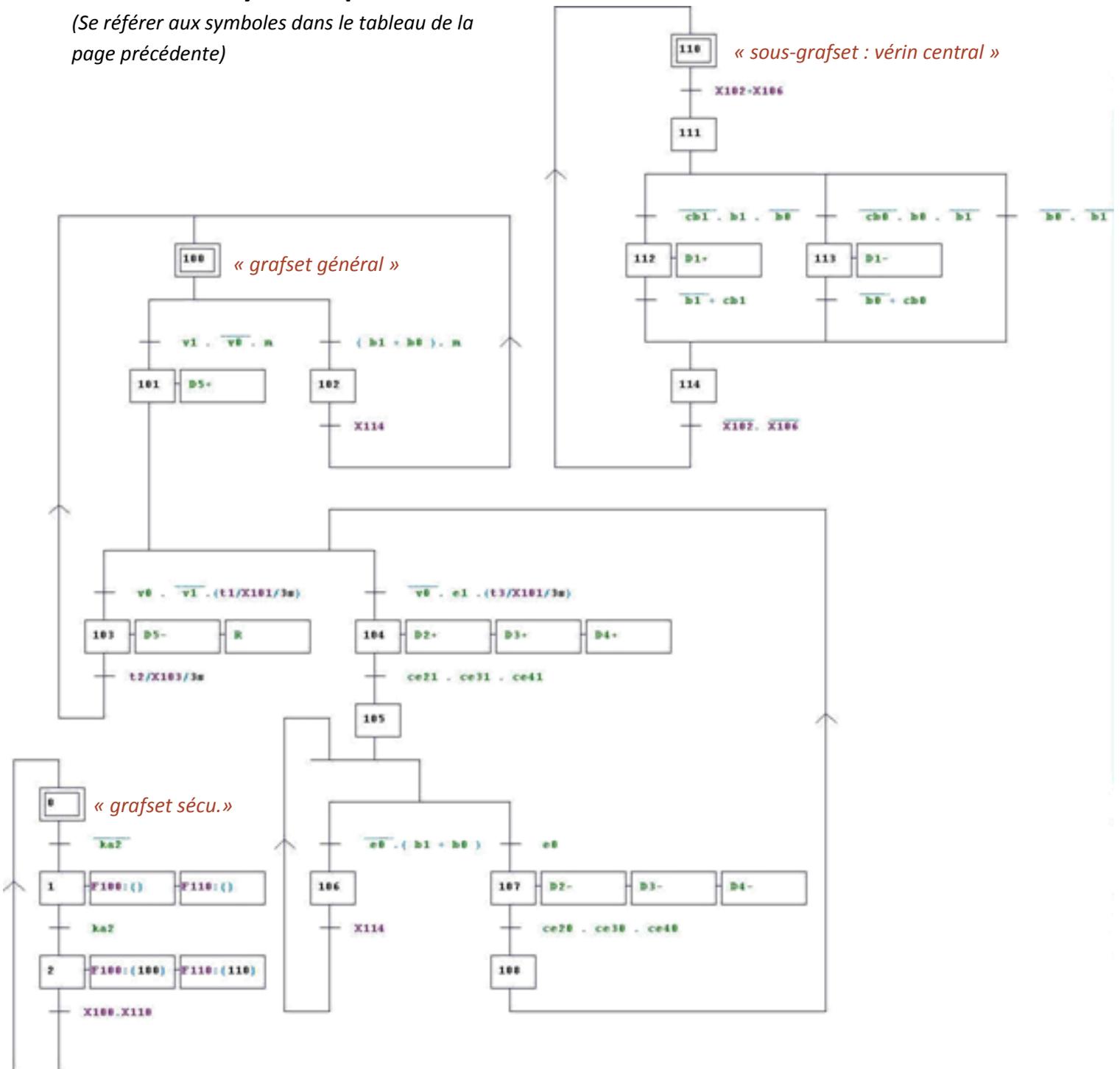
A partir de toutes ces variables, nous avons rédigé l'automatisation avec un langage **GRAFSET** (cf. le grafset rédigé à la page suivante). Une fois chacun des grafsets établis nous avons utilisé la salle d'automatisme de l'IUT pour **tracer et simuler** son bon fonctionnement (cf. screen d'écran à droite).



2.10.2 Grafsets

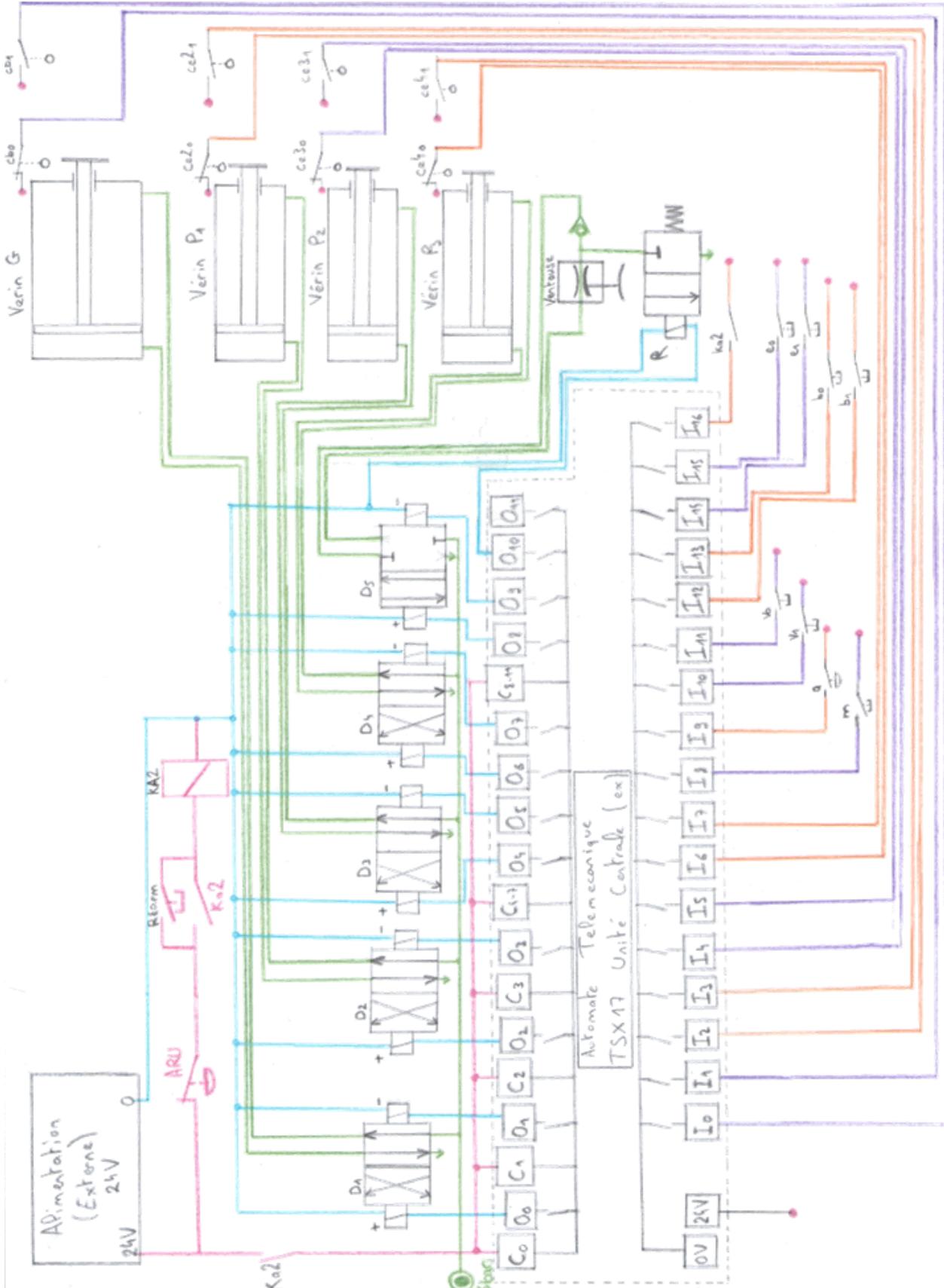
Grafsets du système palonnier :

(Se référer aux symboles dans le tableau de la page précédente)



2.10.3 Câblages

A partir des **noms de variables relatif au symbole** définit dans le tableau de la page 13, nous avons effectué **le câblage** de l'automate :



3 CONCLUSION / ...SUITE ?

3.1 Finalité de l'avant projet

*Arrivé à la fin du projet, et en rappelant que le but principal et initial de ce projet, était de **réaliser l'étude d'avant-projet de fabrication d'un palonnier de manutention** ; Nous pouvons en tirer ce bilan :*

- ✓ Nous n'avons pas rencontré de problème majeur durant ces deux semestres, ce qui nous a permis de **respecter tous les délais** que nous nous étions fixés. Nous pouvons dire que nous avons **rempli les objectifs** que nous et EADS avaient fixés en début de projet.
- ✓ Ce projet nous a appris à **organiser notre temps** tout en respectant des consignes et un cahier des charges qui nous est donné. Il nous a fait prendre conscience de toutes les étapes et de tous les efforts que demande un tel projet.
- ✓ La **visite d'EADS** nous a beaucoup aidé, et en plus de nous faire découvrir les locaux et tout l'environnement extérieur qui dépend du projet, elle nous a motivé et nous a fait prendre conscience de l'importance du projet.
- ✓ L'autre partie qui nous a fait progresser est **la modélisation** des pièces sur **Inventor**. Elle nous a permis de découvrir de **nouvelles fonctionnalités** du logiciel tout en renforçant les bases que nous connaissions déjà. Pour ses fonctionnalités, il s'agit surtout d'**Inventor Studio** qui a montré le parcours total des panneaux cylindriques dans leur environnement. Grâce à ce module, nous avons réalisé des vidéos retravaillées sous **VEGAS 7**, ainsi que des screens virtuel les plus réalistes possibles (comme vous pouvez le constater tout le long de ce rapport).
- ✓ Toujours dans la partie CAO, la conversion en **STEP** (.stp ou .step) du modèle de palonnier, et donc le transfert sous **CATIA V5**, nous a permis de découvrir en avance ce logiciel que nous devons adopter l'année prochaine à l'IUT. De plus cela nous a permis de **relier nos cours théoriques et manuscrites de cinétiques avec un moyen de réalisation concret sous CATIA**.
- ✓ Tout le long de ce projet professionnel, nous avons pu également appliquer concrètement un grand nombre de matières du DUT GMP comme le **Dimensionnement Des Structures**, **l'étude des matériaux**, la **statique**, **l'automatisme**, les **méthodes**, **l'analyse fonctionnelle**...
- ✓ Ce projet nous a offert une **expérience professionnelle** non négligeable, qui complète grandement toute la théorie de nos cours universitaire. Cette expérience professionnelle concerne en particulier le **contact avec les entreprises** comme **EADS-Astrium** (entreprise européen pour le spatial), **PIAB** (entreprise spécialisé dans la technologie du vide : ventouses, VGS...), **BFL** (revendeur généraliste) **SNEPRO** (sous-traitant d'EADS), ...

3.2 L'année prochaine ?

Notre Avant Projet ayant été acceptée par **EADS**, ces derniers ont fait appel à une société de sous-traitance afin de **chiffrer la fabrication**.

Cette société (**SNEPRO**) nous a alors fourni un devis, dont voici un extrait :



« Cette offre est basée sur les avant-projets reçus les 13/03/2008 et 25/03/2008, pour un moyen complémentaire de préhension et d'intégration des panneaux cylindriques du SYLDA.

Nous avons étudié à partir des principes et de vos contraintes d'environnement et de process, un moyen qui répondrait également aux diverses contraintes de sécurité d'utilisation.

Des réunions techniques communes seraient programmées dès le démarrage du projet pour le lancement, la validation et l'avancement du projet, en collaboration avec les élèves de l'IUT travaillant actuellement sur ce projet. »

Comme énoncé dans cette introduction, des **réunions** seront prévues, afin de travailler avec cette société lors de la conception et la réalisation du palonnier. Ce travail pourrait être pris en compte comme **notre projet de deuxième année** (S3) de GMP.

Par ailleurs voici leurs estimations :

« Offre budgétaire aux conditions économiques 2008, à confirmer en fonction de votre cahier des charges définitif.

Prix global de : **175 530 € HT**

Options :

- Bâti de stockage et de transport sur roues pneumatiques : **17 574 € HT**

- Modification de 16 racks de stockage et fourniture de 3 supports de racks de stockage sur roues à bardage : **39 572 € HT**

Valeurs hors taxes, en Euros. »

4 ANNEXES

4.1 Contacts

4.1.1 Etudiants

	<p>BARRUET Jonathan barjo08@hotmail.com 06.70.49.24.28</p>
	<p>BEAU Alexandre alex_of_95@hotmail.com 06.60.18.44.48</p>
	<p>BOUZERZOUR Abdel Hakim hakimouche16@yahoo.fr 06.67.01.78.86</p>
	<p>GILLARD Alexis snowfun2@hotmail.fr 06.61.31.13.38</p>
	<p>MAURICE Sébastien mau.sebastien@gmail.com 06.25.06.23.36</p>
	<p>VILAR Christophe quaresma-78-fcp@hotmail.fr 06.81.28.50.12</p>

4.1.2 EADS

<p>Préparateur composite <i>Auteur du cahier des charges</i></p>	<p>COUSTILLET Jean Luc jean-luc.coustillet@astrium.eads.net</p>
<p>Responsable du service Méthodes et Préparation Composite. <i>Chef de service</i></p>	<p>MAURICE Pascal pascal.maurice@astrium.eads.net 01.39.06.39.81</p>
<p>Ingénieur Pour l'Ecole <i>Chargé de mission auprès de l'Académie de Versailles</i></p>	<p>PUIG Jean Paul jean-paul.puig@astrium.eads.net 01.34.78.82.07</p>

4.1.3 Aides des professeurs de l'IUT

<p>Directrice des études GMP. <i>Méthodes, CAO, FAO... et chargé des emplois du temps de l'IUT. Tutrice de notre projet.</i></p>	<p>CHEVROT Carole carole.chevrot@uvsq.fr 01.30.98.13.53</p>
<p>Professeur d'automatisme, électricité. <i>Nous a aidé sur la partie automatisme et des tests de la ventouse.</i></p>	<p>BRUGEL Michel michel.brugel@uvsq.fr 01.30.98.55.82</p>
<p>Professeur de dimensionnement des structures, résistance des matériaux. <i>Nous a aidé pour toute la partie DDS.</i></p>	<p>AKRACHE Redouane redouane.akrache@uvsq.fr</p>

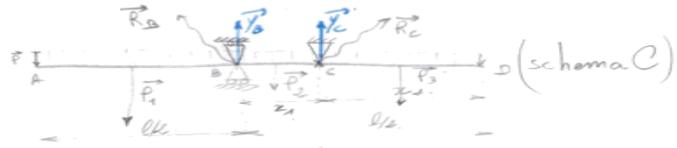
4.2 Calculs de RDM

$\sum \vec{F} = \vec{0} \Rightarrow \vec{F} + \vec{R}_A = \vec{0}$
 $\sum \vec{M} = \vec{0}$
 $M_{\vec{F}} + M_{\vec{R}_A} = \vec{0}$
 $\Rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -P \\ 0 \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} x_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} -R_A \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \vec{0}$
 $\Rightarrow (P \cdot x_1) + (y_A \cdot x_2) = 0 \Rightarrow y_A = -\frac{P x_1}{x_2}$

(schema A)

* les efforts

$\vec{P}_1 = -P \cdot \vec{e}_y$
 $\vec{P}_2 = -(l/2 - x_2) \cdot \vec{e}_y$
 $\vec{P}_3 = (x_2 + P) \cdot \vec{e}_y$



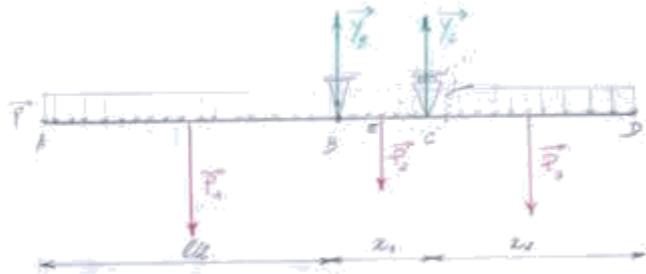
$\Rightarrow \sum \vec{F} = \vec{P}_1 + \vec{P}_2 + \vec{P}_3 + \vec{R}_B + \vec{R}_C = \vec{0} \Rightarrow P_1 + P_2 + P_3 = R_B + R_C \quad / y$

→ les composantes selon \vec{e}_x

$\sum \vec{M}_B = \vec{0} \Rightarrow P_1 \cdot l/4 - P_2 \cdot (x_1/2) - (x_2/2 + x_1) \cdot P_3 + R_C \cdot (x_1) = 0$
 $\Rightarrow R_C = \frac{P_1 \cdot l/4 - P_2 \cdot (x_1/2) - P_3 \cdot (x_2/2 + x_1)}{x_1}$

$R_C = \frac{P_1 \cdot l/4 - P_2 \cdot (l/2 - x_2) - P_3 \cdot (x_2/2 + l/2 - x_2)}{-l/2 + x_2}$
 $\Rightarrow R_B = P_1 + P_2 + P_3 - R_C \Rightarrow R_B = P_1 + P_2 + P_3 + \frac{P_1 \cdot (l/4) - P_2 \cdot (x_1/2) - P_3 \cdot (x_2/2 + x_1)}{x_1}$

* Flexion
→ étude des efforts sur la travée



→ travée AB

$T_y = -P \cdot x$
 $M_x = -(P \cdot x \cdot \frac{x}{2}) \Rightarrow T_y = -\frac{P x^2}{2}$
 $EIV'' = T_y \Rightarrow EIV'' = -\frac{P x^2}{2}$
 $\textcircled{1} EIV' = -\frac{P x^3}{6} + C_1$
 $\textcircled{2} EIV = -\frac{P x^4}{24} + C_1 x + C_2$

* côté gauche



→ conditions Li en B (x=l/4)
 $\begin{cases} V(l/4) = 0 \\ (V'_1)_B = (V'_2)_B \end{cases}$

→ Tronçon BC :

$$T_y = -(Y_0 - P_1 - P_2) \cdot A \cdot l_2 + P_1 \cdot (2 - l_2) - Y_0$$

$$M_y = -(P_1 \cdot l_2 + x \cdot l_2) - Y_0 (x - l_2) + P_2 \left(\frac{x - l_2}{2} \right)$$

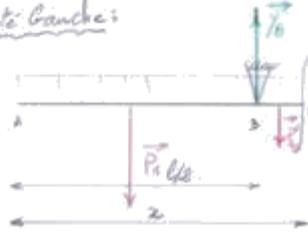
$$0'' = \left[P_1 \left(\frac{l_2^2}{3} + \frac{x l_2^2}{2} - \frac{l_2^3}{4} \right) - Y_0 (x - l_2) - P \left(\frac{x - l_2}{2} \right)^2 \right]$$

$$= -P \left(\frac{x l_2}{2} - \frac{l_2^2}{2} \right) + Y_0 (x - l_2) - P \left(\frac{x - l_2}{2} \right)^2$$

$$= -P \left[\left(\frac{x l_2}{2} - \frac{l_2^2}{2} \right) + \left(\frac{x - l_2}{2} \right)^2 \right] + Y_0 (x - l_2)$$

$$= -P \left[\frac{x l_2}{2} - \frac{l_2^2}{2} + \frac{x^2 - 2x l_2 + l_2^2}{4} + \frac{l_2^2}{4} \right] + Y_0 (x - l_2) \Rightarrow \boxed{-P \left(\frac{x^2}{2} \right) - Y_0 (x - \frac{l_2}{2})} = M_y$$

côté gauche :



$$EIV''' = M_y \Rightarrow EIV''' = -P \left(\frac{x^2}{2} \right) - Y_0 (x - \frac{l_2}{2}) \quad (1)$$

$$EIV'' = -P \left(\frac{x^3}{6} \right) + Y_0 \left(\frac{x^2}{2} - \frac{x l_2}{2} \right) + C_3 \quad (2)$$

$$EIV' = -P \left(\frac{x^4}{24} \right) + Y_0 \left(\frac{x^3}{6} - \frac{x^2 l_2}{4} \right) + C_3 x + C_4 \quad (3)$$

→ Conditions limites
en B ($x = l_2$) : $V_B = 0$

en C ($x = \frac{l_2}{2} + x_1$) : $V_C = 0$

→ Tronçon CD :

$$T_y = P_3 = P \cdot (l - x)$$

$$M_y = -P \left(\frac{(l - x)^2}{2} \right)$$

$$EIV''' = M_y \Rightarrow EIV''' = -P \left(\frac{(l - x)^2}{2} \right) \quad (4)$$

$$EIV'' = -P \left(\frac{x l^2}{2} - \frac{l x^2}{2} + \frac{x^3}{6} \right) + C_5 \quad (5)$$

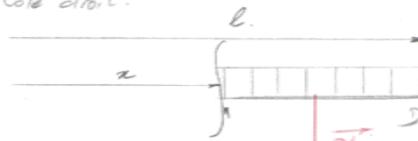
$$EIV' = -P \left(\frac{x^2 l^2}{4} - \frac{l x^3}{6} + \frac{x^4}{24} \right) + C_5 x + C_6 \quad (6)$$

→ conditions limites :

$V_C = V_D$ / $x = l_2 + x_1$

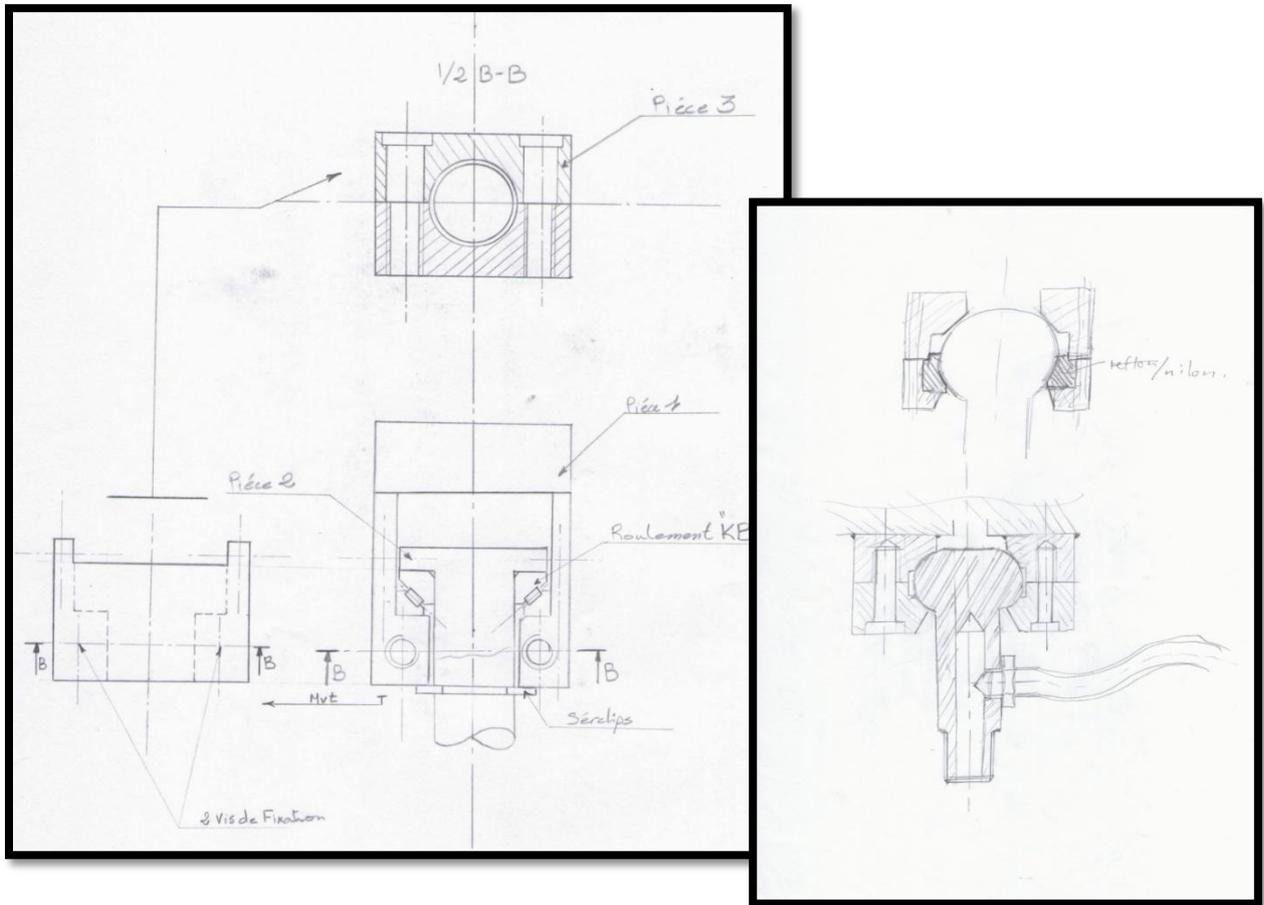
$V_C = 0$ / $x = l_2 + x_1$

côté droit :



4.3 Croquis

4.3.1 Liaisons pivot vertical et liaison rotule



4.3.2 Chariot de rack retourné

