

# Compte rendu de projet Fusée expérimentale

# EfrEst

**2001 - 2002**  
**partenariat**



Estaca Space Odyssey



Aéro - EFREI





---

---

## **REMERCIEMENTS**

---

---

Les membres de ce projet tiennent à remercier tous ceux sans qui EfrEst n'aurait pas pu voler :

- L'**ESTACA** pour nous avoir soutenu, offert des locaux et des moyens de conception.
- M. **Nierveze**, radio-amateur, pour son aide précieuse concernant l'émission HF.
- L'**Institution Ste Geneviève** et plus particulièrement Mme **Mano** pour la gravure des cartes électroniques.

Nos partenaires industriels et financiers :

- Le **Crédit Lyonnais**.
- La société **Leduc** pour la réalisation du ressort de poussée.
- La société **Parker Pneumatique** pour l'ensemble du système de séparation (vérin pneumatique et électrovanne).
- La société **Union thermique** pour l'aluminium AU-4G.
- La société **Aérazur** pour la réalisation du parachute.

L'ESO tient également à remercier le **CNES** et tous les membres de l'**ANSTJ** pour la gestion et l'organisation de l'activité aérospatiale des clubs amateurs français.

Enfin, un grand merci à **Alain DARTIGALONGUE** pour son appui technique et ses conseils.





---

---

## **SOMMAIRE**

---

---

<b>INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
<b>PRESENTATION DU PROJET</b>	<b>2</b>
<b>PARTICIPANTS</b>	<b>3</b>
<b>MECANIQUE</b>	<b>4</b>
1. CORPS DE LA FUSEE	4
2. SEPARATION ET EJECTION DU PARACHUTE	4
2.1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	4
2.2. DIMENSIONNEMENT DU RESSORT D'EJECTION	6
2.3. DIMENSIONNEMENT DU VERIN PNEUMATIQUE	7
2.4. RALENTISSEUR : PARACHUTE	7
3. STABILITE	8
<b>EXPERIENCE</b>	<b>9</b>
1. LA PARTIE AUDIO	9
2. L'EMISSION VIDEO	10
2.1. LA CAMERA	10
2.2. L'EMETTEUR HF ET LA RECEPTION	10
2.3. ASSERVISSEMENT EN POSITION DE LA CAMERA	11
<b>SEQUENCEUR</b>	<b>13</b>
1. PRESENTATION GENERALE, ROLE DU SEQUENCEUR	13
2. ANALYSE DU BESOIN ET CHOIX TECHNOLOGIQUES	13
3. DESCRIPTION DES SEQUENCEURS, PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	15
3.1. SEQUENCEUR ANALOGIQUE	15
3.2. SEQUENCEUR NUMERIQUE	17
3.3. GESTION DES SIGNAUX ET CIRCUIT DE PUISSANCE	19
4. SIGNALISATION	20
5. ALIMENTATION	20
<b>LA CAMPAGNE DE LANCEMENT</b>	<b>21</b>
1. SIMULATION SOUS LE LOGICIEL TRAJEC	21
2. LES CONTROLES	21
3. SAMEDI 4 AOUT 2002 : LE LANCEMENT	21
4. RESULTATS DE L'EXPERIENCE	22
<b>CONCLUSION</b>	<b>24</b>





---

## *INTRODUCTION*

---

Le projet EfrEst est un projet de fusée expérimentale conçue et réalisée en coopération entre les membres de l'ESO (Estaca Space Odyssey) et ceux de l'Aéro-EFREI. Ces deux associations, créées en 1991, sont respectivement les clubs aérospatiaux de l'ESTACA (Ecole Supérieure des Techniques Aéronautiques et de Construction Automobile) et de l'EFREI (Ecole Française d'Electronique et d'Informatique).

Ce projet a été mené en suivant le cahier des charges « Fusex » de l'ANSTJ (Association Nationale des Sciences et Techniques Jeunesse) qui regroupe tous les clubs aérospatiaux de France en leur fournissant l'ensemble de l'encadrement nécessaire à la réalisation de tels projets. L'ANSTJ fournit les propulseurs avec l'aide du CNES (Centre National d'Etudes Spatiales), organise la campagne de lancement, encadre les clubs au cours de l'année et apporte son aide par un suivi de projet tout au long de l'année.

Ce compte rendu de vol expose dans un premier temps les points essentiels du fonctionnement de la fusée. Nous y présentons également les difficultés que nous avons pu rencontrer et nous terminons en analysant le demi-succès du vol d'EfrEst.



Juste avant le lancement : test de compatibilité rampe (Mehrir)



## PRESENTATION DU PROJET

EfrEst symbolise 10 ans d'activités aérospatiales au sein de l'ANSTJ pour l'ESO et l'Aéro-EFREI. Sur un plan technique, ce projet a pour but la retransmission sonore et vidéo du vol de la fusée afin d'identifier les différentes phases du vol. Dotée d'une caméra pivotante, la fusée permet de filmer dans un premier temps le sol durant toute l'ascension, la séparation et l'ouverture du parachute. Quelques secondes après l'apogée, la caméra bascule et permet à nouveau de filmer le sol et la descente sous parachute. Simultanément, nous pouvons bénéficier d'une émission sonore. Pour ce projet, nous avons eu le soutien de M. Nierveze (radio-amateur) qui a conçu un émetteur hautes fréquences spécialement prévu à cet effet. Nous pouvons recevoir l'image et le son en temps réel, sur un système TV standard. Ainsi le public peut suivre toute l'évolution du vol en direct.

Caractéristiques générales :

Caractéristiques mécaniques	
Hauteur	2 m
Diamètre	105 mm
Masse (avec propulseur)	10 kg
Type de séparation	transversale
Type de ralentisseur	parachute
Nombre d'ailerons	4
Propulseur	Chamois
Données de vol TRAJEC (rampe à 80° d'inclinaison)	
Accélération maximale	94 m/s <sup>2</sup> (~ 10g)
Vitesse maximale	188 m/s (~ 680 km/h)
Temps de culmination	15,17 s
Vitesse à culmination	24 m/s (~ 87 km/h)
Altitude relative à culm.	1186 m
Expérience	
Audio / Vidéo	télémesure (1,2 GHz)





## ***PARTICIPANTS***

**M. NIERVEZE (Radio-amateur)**  
Réalisation de l'émetteur HF

**Clément MARION (Aéro-EFREI)**  
Soutien technique

**Alexandre LABORIE (Aéro-EFREI)**  
Responsable projet + expérience (Audio / Vidéo)

**Laurent DELESSARD (ESO)**  
Responsable projet + mécanique

**Sébastien JOANNES (ESO)**  
Responsable électronique (séquenceur / pilotage caméra)

**Richard HESLOUIN (ESO)**  
Responsable mécanique

Julien BOLDRINI (ESO)

Thibaut JAILLET (ESO)

Jean-Pascal JOARY (ESO)

Michaël REGNAULT (ESO)

Marielle RUFIN (ESO)

Benjamin LEROY (ESO)

Osman SEZER (ESO)



Préparation en « tente club »



---

---

## *MECANIQUE*

---

---

### 1. Corps de la fusée

Les dimensions de l'émetteur HF nous ont imposé un diamètre intérieur de près de 102 mm. De plus, afin de garantir la protection HF des organes électroniques sensibles, nous avons opté pour une structure en carbone qui s'avère être un excellent filtre pour les ondes électromagnétiques. La peau en carbone (non porteuse) est réalisée à l'ESTACA par une technique utilisée de nombreuses fois et qui consiste à draper de la fibre de carbone sur un tube en PVC avec un mélange résine-durcisseur. Pour faciliter le démoulage, nous avons intercalé entre le PVC et la fibre un papier sulfurisé peu adhérent à ces matériaux.

Notre antenne n'étant pas sortante, nous devons utiliser un matériau perméable aux ondes électromagnétiques. Nous avons donc remplacé la fibre de carbone par de la fibre d'aramide (Kevlar®) qui a été moulée sous vide.



### 2. Séparation et éjection du parachute

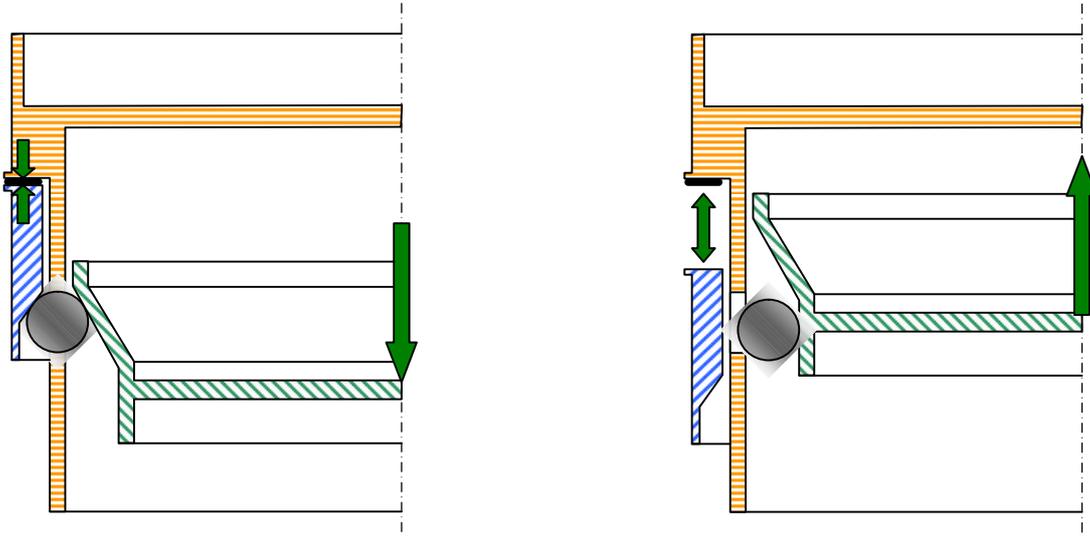
#### 2.1. Principe de fonctionnement

La séparation constitue la partie la plus sensible de la mécanique et nous souhaitons un système fiable pour cette fusée anniversaire. Nous avons donc opté pour une séparation transversale pneumatique déjà utilisée sur 4 projets de l'ESO avec un taux de réussite de 75% (seul le premier vol fut un échec).



Les fonctions du système de séparation sont multiples :

- Assurer la fermeture de la fusée tout en contenant l'effort exercé par le ressort d'éjection,
- Préserver l'axe longitudinal de la fusée,
- Permettre une éjection franche du parachute.



Le mécanisme de séparation se compose de 4 sous-ensembles fonctionnels :

- {Micro-vérin pneumatique à simple effet avec ressort de rappel ; bague de séparation supérieure}
- {Bague de séparation inférieure}
- {Piston du vérin ; bague piston}
- {3 billes disposées à 120°}

Le chargement en air du vérin (non représenté sur le schéma) permet de descendre la bague piston et ainsi de maintenir en position les 3 billes sur les 2 surfaces coniques. La valeur de l'angle  $\alpha$  (inclinaison de ces surfaces) doit être judicieusement choisie de manière à minimiser les contraintes horizontales et permettre un jeu de fonctionnement correct. Nous avons opté pour une valeur comprise entre 25° et 30°. L'effort  $F_r$  exercé sur la bague supérieure par le ressort d'éjection se retrouve réparti sur les trois billes et une petite analyse de statique permet de montrer que, quel que soit l'angle  $\alpha$ , le piston du vérin est soumis à un effort vertical qui vaut :

$$\frac{3}{2} \left( \frac{F_r}{3} \right) = \frac{F_r}{2}$$

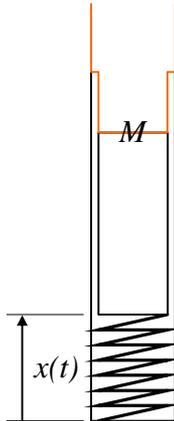
Le ressort d'éjection a été dimensionné conjointement avec le vérin de manière à ce que tout soit compatible.



## 2.2. Dimensionnement du ressort d'éjection

Le ressort doit exercer une poussée suffisante de manière à ce que les coquilles contenant le parachute soient correctement éjectées. Afin de garantir ce fonctionnement en condition de vol, le cahier des charges impose une sortie franche des coquilles en soumettant la fusée à la pesanteur suivant son axe longitudinal.

Une simple étude énergétique du système permet d'obtenir la raideur  $k$  nécessaire pour satisfaire les paramètres d'éjection.



$l_c$  = longueur du ressort comprimé (m)

$l_0$  = longueur du ressort à vide (m)

$k$  = raideur du ressort (N/m)

$h = x_{\max}$  (m)

$M$  = masse à éjecter (kg)

$$k = \frac{2Mg(h - l_c)}{(l_0 - l_c)^2}$$

Cependant, il convient de ne pas sur-dimensionner ce ressort pour ne pas risquer une ouverture prématurée de la fusée (notamment au moment de la fin de propulsion lorsque la fusée est soumise à une légère décélération).

Les caractéristiques du ressort d'éjection sont donc les suivantes :

$$l_c = 0,090 \text{ m}$$

$$l_0 = 0,300 \text{ m}$$

$$k = 1200 \text{ N/m}$$



### 2.3. Dimensionnement du vérin pneumatique

L'effort appliqué par le ressort sur la partie supérieure est donc :  $F_r = k(l_0 - l_c)$

En choisissant  $k = 1200 \text{ N/m}$ , on obtient  $F_r = 252 \text{ N}$

Le piston du vérin est donc soumis à un effort de 126 N.

Le cahier des charges préconise un CS de 2 où CS est le coefficient de sécurité (rapport entre la valeur maximale que peut supporter un équipement et la valeur normale). Aussi, nous avons choisi un vérin (diamètre 25 mm) qui permet de transmettre un effort de poussée de l'ordre de 250 N (sous une pression de 6 bars). Nous avons opté pour une course de 10 mm qui nous permettait d'avoir un encombrement minimal et ainsi de limiter les masses des différentes pièces.

### 2.4. Ralentisseur : parachute

Le parachute de forme hémisphérique a une surface de  $1,5 \text{ m}^2$  de manière à obtenir une vitesse de descente proche de  $10 \text{ m/s}$ . Il a été réalisé par la société Aérazur, spécialiste dans ce domaine, véritable gage de sécurité pour notre fusée. Le ralentisseur doit être suffisamment solide pour résister au choc à l'ouverture car le parachute et ses fixations subissent une force directement proportionnelle à la vitesse de la fusée au moment de l'ouverture :

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot C_x \cdot V_{ouv}^2 \cdot S_{projetée} \approx 1800 \text{ N}$$



L'ensemble de la chaîne de récupération a été sur-dimensionné afin de garantir une descente sous parachute en cas d'ouverture prématurée ou extrêmement tardive. Dans ce cas, on peut atteindre des efforts allant jusqu'à plusieurs tonnes.

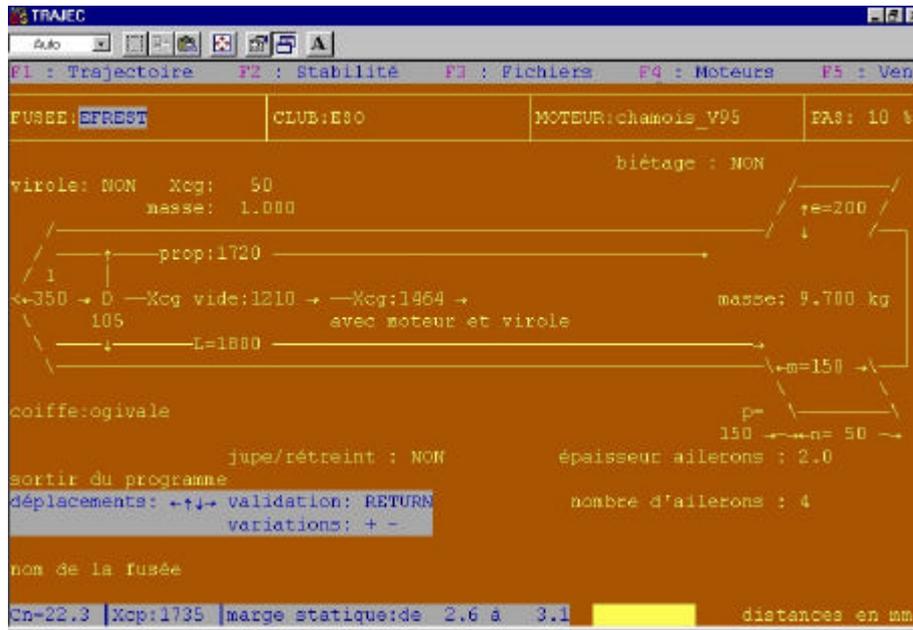
Emerillon et suspentes du parachute.



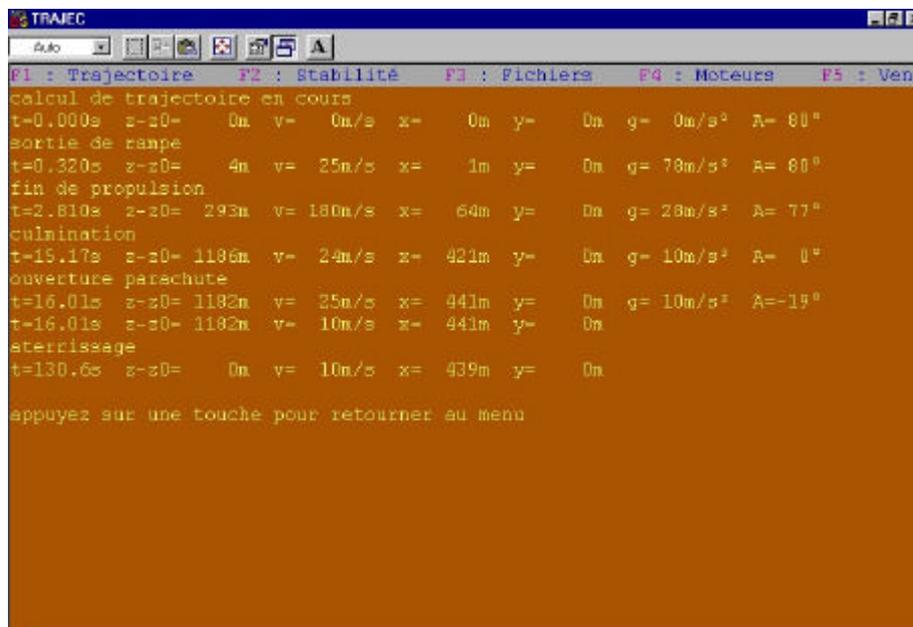


### 3. Stabilité

La stabilité a été étudiée sous le logiciel TRAJEC fourni par l'ANSTJ. En rentrant toutes les données sur la géométrie et la répartition des masses de la fusée, ce logiciel nous permet de vérifier la stabilité, prévoir le temps de culmination et donc de valider une partie du projet.



Etude de la stabilité



Etude de la trajectoire



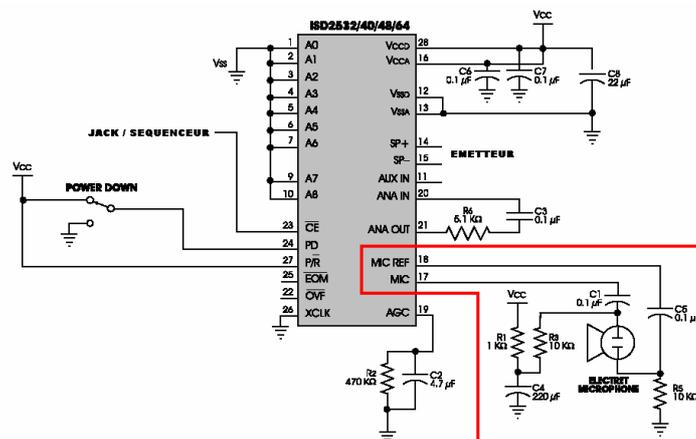
## EXPERIENCE

L'expérience de la fusée EfrEst consiste à retransmettre les images d'une caméra miniature embarquée ainsi qu'une séquence sonore préenregistrée grâce à un émetteur haute fréquence expérimental. Le principal objectif de la retransmission vidéo est de pouvoir identifier les différentes phases du vol tout en corrélant ces résultats aux estimations de TRAJEC. La caméra montée sur tête pivotante permet de filmer la partie inférieure de la fusée ainsi que le sol durant tout le vol. Nous pouvons ainsi observer la séparation et l'ouverture du parachute. Simultanément, nous pouvons bénéficier d'une émission sonore. L'émission HF est donc décomposable en une partie audio et une partie vidéo.

### 1. La partie audio

La partie audio est basée sur un circuit intégré ISD2560. La bande sonore préenregistrée est composée de voix humaine et ne dure pas plus longtemps que le temps de vol nominal de la fusée ; elle est contrôlée par des circuits logiques discrets. L'ISD2560 a été choisi parce qu'il peut garder en mémoire 1 minute de son numérisé à 4KHz, permettant une restitution suffisamment bonne de la voix humaine, pendant un temps très long, et est facilement contrôlable par des signaux logiques. L'ISD2560 a été câblé dans sa version finale pour la diffusion uniquement, afin de simplifier la carte électronique. La restitution de la bande sonore est donc déclenchée par une combinaison de signaux logiques. Le schéma suivant montre le câblage dans sa configuration « bon pour le vol ». On remarquera :

- L'interrupteur POWER DOWN, qui permet d'activer l'ISD2560 lorsque la fusée est mise en rampe. Il est représenté sur le schéma ; c'est en fait l'interrupteur général de l'expérience.
- La patte P/R est câblée pour le PLAYBACK (restitution).
- Le signal CE est contrôlé par le jack ou le séquenceur ; lorsque le signal est mis au niveau logique 0 (zéro) sur cette patte, la restitution commence.
- Le circuit encadré en rouge n'est pas présent sur la carte de vol ; il n'est nécessaire que pour l'enregistrement de la bande sonore, et est remplacé par une connexion à la masse sur la carte de vol.
- Les pattes SP+ et SP- sont connectées à l'entrée son de l'émetteur par un câble coaxial blindé.



## 2. L'émission vidéo

### 2.1. La caméra

Les images du vol sont obtenues par l'intermédiaire d'une caméra miniature monochrome CCD (WAT-704R) d'environ 18 mm de diamètre pour une longueur de 40 mm. Il s'agit du modèle CCIR (P3,7 mm, F4,5). L'alimentation de la caméra est de 9V sous 100 mA. Afin de garantir une autonomie suffisante, nous avons opté pour une alimentation régulée à base de 7 piles de 1,5 V (capacité unitaire de 550 mAh). Des tests antérieurs au vol ont montré que la résolution est suffisamment performante pour obtenir une image correcte du paysage à plus de 2 km de portée.



### 2.2. L'émetteur HF et la réception



L'émission vidéo impose l'utilisation de fréquences relativement élevées et nous avons donc fait appel à un radio-amateur (M. Nierveze) pour la réalisation de l'émetteur HF. Il s'agit d'un émetteur de fréquence 1,2 GHz fonctionnant sous 12 V (500 mA) et dont la puissance d'émission est de 500 mW.

La chaîne de réception est relativement simple puisqu'elle est constituée d'une antenne, d'un pré-ampli et d'un décodeur satellite. L'ensemble est relié à un magnétoscope et à une télévision qui permettent de recevoir l'image et le son en temps réel. Ainsi le public peut suivre toute l'évolution du vol en direct.





### 2.3. Asservissement en position de la caméra

#### Objectif :

On souhaite filmer le vol de la fusée, c'est à dire le sol pendant l'ascension et ... encore le sol après culmination. Pour cela la caméra CCD est fixée sur un support mobile. Un servomoteur permet de faire pivoter le support et de définir 3 modes de fonctionnement.

- Position « maintenance » : elle est commandée manuellement par un contacteur. Cette position permet de rentrer la caméra complètement c'est à dire alignée avec l'axe de la fusée. Elle sert notamment à installer et enlever la peau en carbone.
- Position vol 1 : position d'attente dans la rampe et pendant la phase ascensionnelle du vol. La caméra pointe vers l'arrière de la fusée.
- Position vol 2 : position déclenchée environ deux secondes après la séparation, la caméra pointe vers le nez de la fusée (et donc vers le sol).

Les positions 1 et 2 sont commandées automatiquement.

#### Réalisation :

Au regard des contraintes mécaniques (effort et surtout poids/encombrement), de la précision nécessaire et du prix, nous avons choisi d'utiliser un servomoteur de modélisme. Ce dernier, pour un encombrement réduit, nous fournira le couple nécessaire au bon positionnement de la caméra et un asservissement précis de la position. En maintenant la consigne de position, le servo corrigera de lui-même les perturbations.

Les servos se commandent grâce à un signal de fréquence 50Hz (période de 20ms) dont le rapport cyclique varie : le temps haut peut varier de 0,9ms à 1,8ms. C'est la valeur de ce rapport cyclique qui sert de consigne au servo. Pour réaliser ce signal, nous utilisons un oscillateur astable qui envoie toutes les 20ms une impulsion à un oscillateur monté en monostable. La durée du créneau générée à chaque impulsion par le monostable dépend de la valeur de la résistance de charge. Ainsi on pourra modifier le rapport cyclique et donc la position du servo en adaptant la valeur de la résistance.

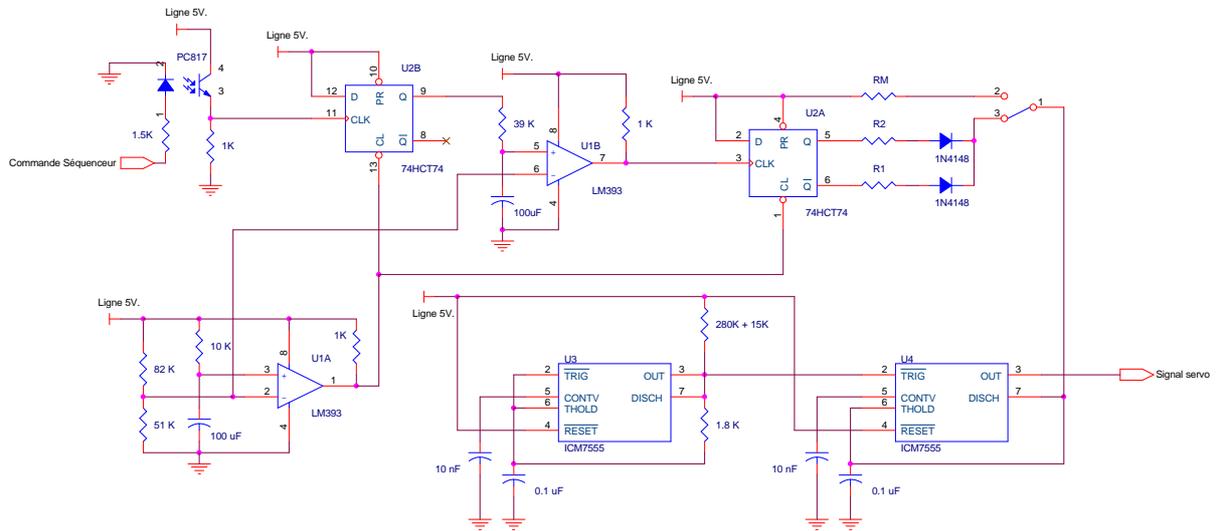
Pour appliquer la résistance correspondant aux positions 1 et 2, on utilise une bascule avec son auto-load. Chaque sortie est reliée à une résistance différente et par l'intermédiaire d'un « OU » à diodes, on envoie le signal adéquate.

Lors de la culmination, on récupère le signal de commande de séparation issu du séquenceur par l'intermédiaire d'un optocoupleur (isolation galvanique du séquenceur). Après mémorisation, ce signal déclenche une temporisation qui fera changer d'état la bascule. Ainsi on remplace la résistance de la position 1 par celle de la position 2, et le servo s'ajuste sur cette nouvelle consigne.

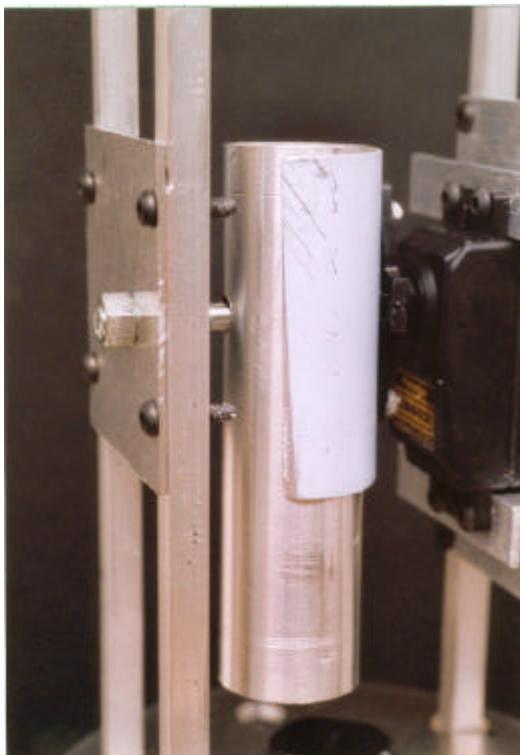


La position « maintenance » est commandée par un switch qui débranche la commande automatique pour connecter, à la place, la résistance de la position M sur le monostable. Lorsque l'on remet l'interrupteur sur la position automatique, on rebranche la commande automatique.

Le schéma de principe est le suivant :



Cette carte de contrôle est alimentée par l'intermédiaire d'une pile 9V via un régulateur 7805. La pile alimente également la carte ISD. Afin d'éviter des perturbations sur la commande du servo, celui-ci est alimenté par une autre pile (9V) également régulée à 5V.



La caméra est protégée par un tube en aluminium qui pivote grâce au servomoteur.





---

---

## SEQUENCEUR

---

---

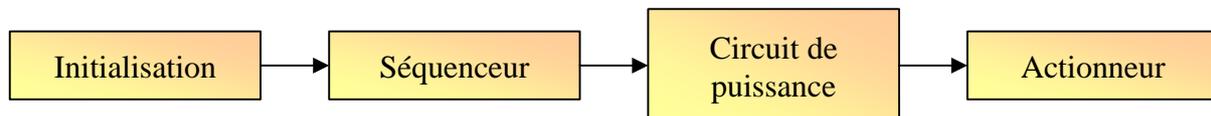
### 1. Présentation générale, rôle du séquenceur

Le séquenceur est un élément de base de la fusée et une attention toute particulière doit y être accordée. Le cahier des charges précise que chaque fusée doit être munie d'un système permettant la mise en œuvre du ralentisseur à culmination, le but du séquenceur est donc de détecter le décollage et de commander le mécanisme de récupération en temps voulu.

Au moins deux types de dispositifs peuvent convenir pour agir à l'apogée :

- Dispositif réglable en temps, déclenché au décollage et ajusté sur l'estimation du temps de culmination. Une simulation « Trajec » permet de connaître avec une précision relativement correcte le temps que la fusée mettra pour atteindre l'apogée. Il suffit alors de réaliser un dispositif électronique capable de restituer ce temps à partir du décollage.
- Dispositif de détection de l'apogée par l'intermédiaire d'un ou plusieurs capteurs.

Ensuite, pour mettre en œuvre le ralentisseur, il suffit généralement d'envoyer un signal au circuit de puissance qui commande un actionneur (servomoteur, électrovanne, cisaille pyrotechnique, ...).



Pour des raisons de simplicité et de fiabilité (toutes deux relatives), nous avons préféré opter pour la première possibilité.

### 2. Analyse du besoin et choix technologiques

Comme nous venons de le préciser, le but du séquenceur est de déclencher le système de séparation en temps voulu. Puisque nous avons opté pour une séparation pneumatique, il convient de réaliser un circuit électronique capable de commander une électrovanne (12Vcc-1,2W) après environ 15 secondes de vol. Il faut prévoir une autonomie suffisante pour couvrir une éventuelle attente en rampe de 45 minutes. En outre, pour une bonne disponibilité du système, le séquenceur doit être facilement réglable en temps et disposer d'une plage de réglage suffisante ( $\pm 50\%$  du temps de déclenchement prévu).

Dans toute la conception du séquenceur, nous nous sommes focalisés sur deux principes fondamentaux :

- Fiabilité
- Indépendance vis à vis des autres systèmes.

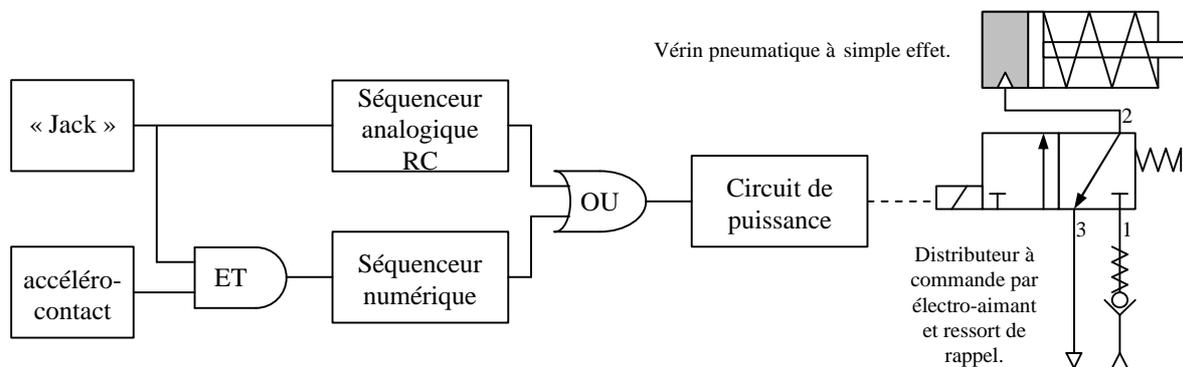


En ce qui concerne la fiabilité, notre démarche a consisté à étudier le séquenceur sous forme de modules (initialisation, décomptage du temps, circuit de puissance...). Pour chacun d'eux, nous avons réalisé une analyse des événements redoutés qui nous a permis d'augmenter la fiabilité du système.

En outre, pour pallier à une éventuelle panne retard lors de la séparation, nous avons décidé de mettre en œuvre deux séquenceurs dont les modes de fonctionnement sont différents.

- Le séquenceur principal est un système électronique qui permet une grande précision (technologie numérique) et qui bénéficie d'un réglage simple du temps de culmination  $t_c$ . Ce séquenceur est déclenché par un accéléro-contact.
- Le séquenceur de secours réglé à  $t_c + dt$  est un séquenceur analogique (charge de condensateur + comparateur) dont la fiabilité n'est plus à démontrer. Ce séquenceur est initialisé par l'intermédiaire d'un connecteur de type « Jack ».

L'initialisation (déclenchement au décollage) étant à la base de tout le système de séparation, nous avons apporté une grande importance à la sécurité. Nous avons donc proscrit le déclenchement inopiné du séquenceur qui pourrait conduire à une ouverture en rampe. Nous avons pallié à une éventuelle panne avance du séquenceur numérique en confirmant l'information de l'accéléro-contact par l'arrachage du « Jack ».



Afin que le séquenceur soit totalement isolé des autres systèmes, il dispose de sa propre alimentation régulée. Les liaisons inter-cartes sont des liaisons optiques (optocoupleurs). En outre, il ne faut pas oublier que toute la fusée sera soumise aux perturbations électromagnétiques de l'émetteur pendant le vol. Pour éviter que l'électronique embarquée ne défie trop la loi d'Ohm, nous avons pris les dispositions suivantes :

- Outre le blindage de l'émetteur, l'intégration de l'électronique se fait dans un tube en carbone fermé par des bagues en aluminium. Toutes les liaisons électriques sensibles entre les cartes sont blindées et les fils non blindés sont torsadés.
- L'élimination des courants parasites se fait par l'intermédiaire d'un découplage efficace de l'alimentation et des signaux sensibles susceptibles d'être parasités.





### 3. Description des séquenceurs, principe de fonctionnement

#### 3.1. Séquenceur analogique

Ce type de séquenceur consiste à utiliser la réponse progressive d'un circuit RC à un échelon de tension et comparer cette réponse à une tension de référence. Un signal de commande est alors généré lorsque la tension aux bornes du condensateur atteint et dépasse la tension de référence. Il suffit donc de choisir les composants en fonction du temps désiré et de soumettre le circuit RC à un échelon de tension au décollage.

##### Activation du séquenceur (initialisation) :

Comme nous l'avons précisé précédemment, l'activation du séquenceur est obtenue par l'intermédiaire d'un connecteur de type « Jack ». Afin d'appliquer un échelon de tension au circuit RC, l'information donnée par le « Jack » (passage à la masse au décollage) est conditionnée par un inverseur. Par l'intermédiaire d'une signalisation lumineuse (led orange), ce type de montage permet de connaître à tout instant l'état du système d'initialisation. Le repositionnement du « Jack » agit comme une RAZ au niveau du séquenceur analogique.

##### Comparaison de la charge à une tension de référence :

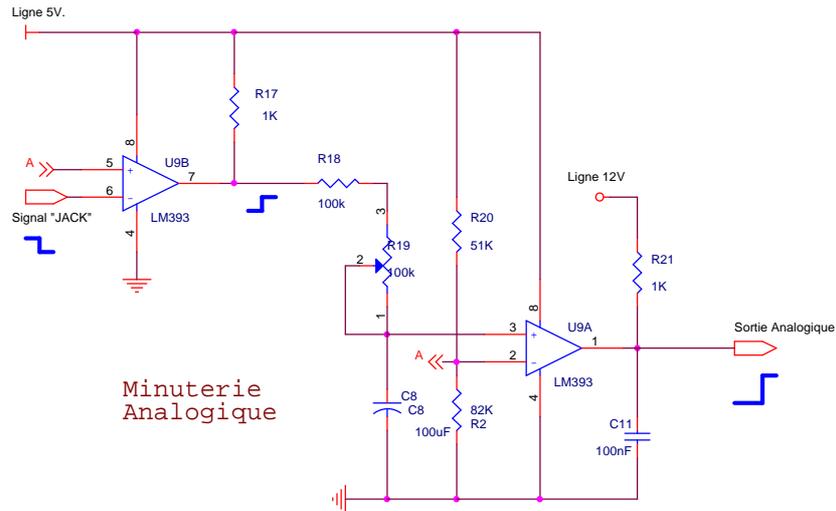
Pour comparer la charge du condensateur à une tension de référence nous avons utilisé un AO spécialement étudié pour fonctionner en comparateur : le 393. Son alimentation est compatible avec la logique 0-5 V du reste du circuit. La référence de tension est obtenue par un montage diviseur de tension.

Le principe de ce montage réside sur le fait que la charge exponentielle peut être assimilée à une droite si le temps de culmination ( $t_c$ ) est petit devant la constante de temps  $t=RC$  du circuit. Nous avons donc réglé  $t$  de manière à ce que  $t_c = t$ .

##### Circuit de puissance / Signal de sortie :

Le transistor MOSFET nécessite une tension supérieure à 4V pour être activé. Pour pallier à d'éventuelles chutes de tension, nous avons décidé d'utiliser la sortie à collecteur ouvert du 393 pour commander le transistor sous une alimentation de 12V.





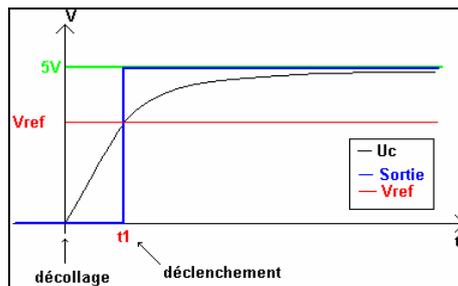
Minuterie  
Analogique

En notant :  $C8 = C$ ,  $R18 = R$ ,  $R19 = R'$ ,  $R12 = R1$ ,  $R20 = R2$

L'étude du système nous fournit les équations suivantes :

$$U_c(t) = 5 \cdot \left[ 1 - \exp\left(\frac{-t}{(R + R') \cdot C}\right) \right] \text{ et } V_{ref} = 5 \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Au déclenchement ( $t = t_1$ ) on a  $5 \cdot \left[ 1 - \exp\left(\frac{-t_1}{(R + R') \cdot C}\right) \right] = V_{ref}$

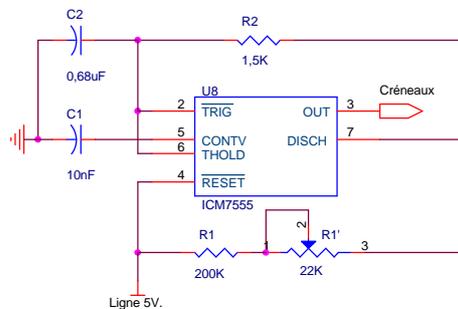


### 3.2. Séquenceur numérique

Le principe de ce type de séquenceur repose sur le comptage d'impulsions générées à une fréquence connue. La technologie numérique permet donc de commander entièrement le séquenceur et de connaître à tout moment son état.

#### Génération des impulsions :

Pour être compatible avec la majorité des compteurs, le signal correspondant à la base de temps doit être carré et de rapport cyclique élevé (le créneau positif doit avoir une durée comprise entre 95 % et 99 % de la période). En outre, le niveau des impulsions doit être compatible avec la technologie employée pour les compteurs, généralement une logique positive 0-5V. Il existe de multiples dispositifs permettant de générer de tels signaux, mais pour sa facilité de mise en place et sa fiabilité, nous avons choisi d'utiliser un « timer » 555.



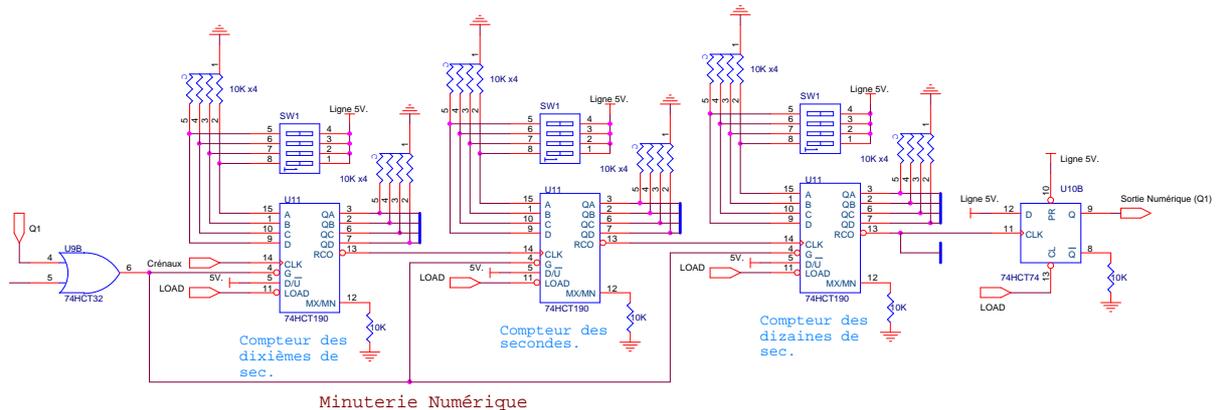
$$\text{Signal de fréquence } f = \frac{1,44}{(R_1 + R_1' + 2.R_2).C_2} \text{ et de rapport cyclique } D = \frac{R_1 + R_1' + R_2}{R_1 + R_1' + 2.R_2}.$$

En choisissant les valeurs indiquées sur le schéma ( $R_1' \approx 8,8 \text{ k}\Omega$ ), on obtient une fréquence de 10 Hz et un rapport cyclique au dessus de 99 %. Ce type de signal permet d'obtenir une précision inférieure à la dixième de seconde. Il faut noter qu'une telle précision n'est pas en rapport avec les estimations « Trajec » mais nous souhaitons pouvoir ajuster le séquenceur à la demi-seconde près.



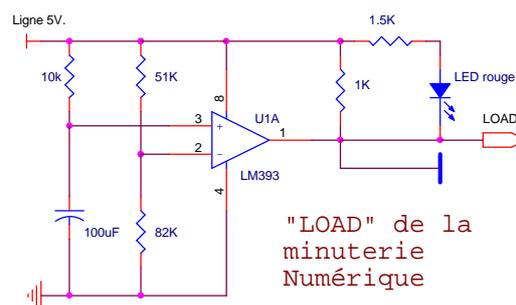
### Comptage :

Pour compter (ou plutôt décompter) les impulsions, nous avons opté pour des compteurs-décompteurs synchrones pré-positionnables de type 74HCT190. Il s'agit de compteurs qui comportent entre autre une sortie « RCO ». Cette sortie permet de détecter le passage à 0 et donc la fin du décompte. Chaque compteur est donc affecté à une unité différente (10<sup>ème</sup> de seconde, seconde, dizaine de seconde). Comme beaucoup de compteurs, ils permettent de suivre en temps réel le décompte par l'intermédiaire de quatre sorties binaires.



### Pré-positionnement de la valeur correspondant au temps de culmination :

Le compteur 74HCT190 est un compteur BCD qui permet donc de compter de 0 à 9. Le réglage de la position de départ (temps à décompter) s'effectue sur les quatre entrées de pré-positionnement avec des « Dipswitchs ». La mise en mémoire de ces valeurs s'effectue automatiquement lors de l'allumage de la carte via le module « Load ».



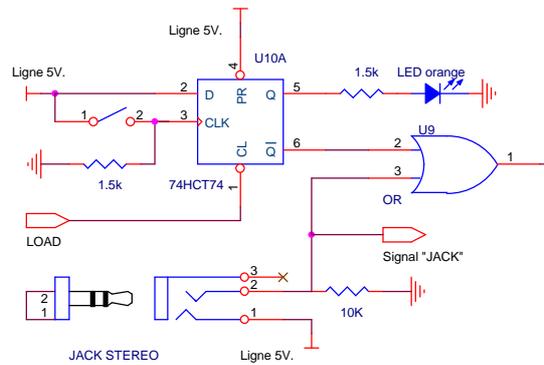
Grâce à une fréquence d'impulsions de 10 Hz à la sortie du générateur de créneaux, il est possible de déterminer un temps allant jusqu'à 99,9 secondes.

Remarque : Le code BCD (Binary Coded Decimal) a été créé pour rattacher le système binaire au système décimal, c'est-à-dire en créant des « unités de comptage » capables de compter de 0 à 9 et non au-delà. Comme 9 est représenté par 1001 en binaire, il faut 4 rangs binaires (4 bits) pour représenter le système décimal. L'avantage d'un compteur BCD (4 bits) réside dans le fait qu'il permet de diviser par 10 la fréquence d'horloge initiale.



### Activation du séquenceur (Initialisation) :

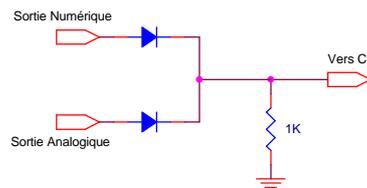
Comme nous l'avons précisé précédemment, l'activation de ce séquenceur dépend de la combinaison de deux indications (accéléro-contact et « Jack »). Sans rentrer dans les détails, un dispositif d'initialisation permet d'autoriser le décompte à partir du décollage jusqu'à culmination (dispositif non visible sur ce schéma).



### 3.3. Gestion des signaux et circuit de puissance

Une double bascule D de type 74HCT74 et une quadruple porte OR (74HCT32) permettent de gérer l'ensemble des états du séquenceur. Ces deux composants forment en quelque sorte le « cerveau » du montage. Ils servent à déclencher et maintenir l'autorisation de comptage le temps nécessaire. Le conditionnement des signaux de commande des deux séquenceurs est réalisé par une l'intermédiaire d'une porte « OU » à diodes.

Sortie sur le circuit  
de puissance



Le circuit de puissance est constitué par un transistor MOSFET canal N (BUZ10). Celui-ci n'enverra un signal à l'électrovanne que si le signal sur son entrée dépasse un certain seuil de tension (4V). Afin de garantir le niveau de sortie du signal numérique (notamment après la porte 'OU' à diodes), la tension logique de 5V a été portée à 12V par l'intermédiaire d'un transistor NPN 2N2222.



## 4. Signalisation

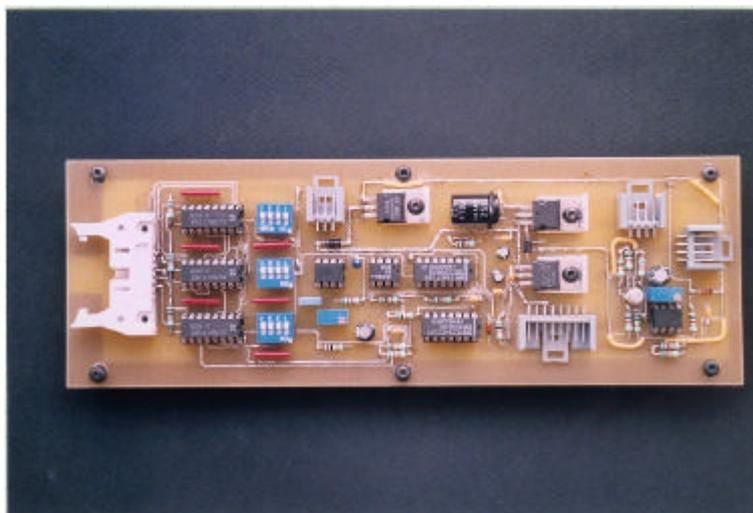
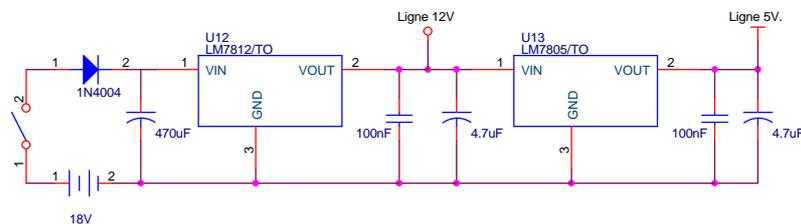
La signalisation est extrêmement importante puisqu'elle permet de connaître à tout moment l'état du séquenceur :

- Séquenceur sous tension ou hors tension.
- Séquenceur actif (la fusée a décollé) ou inactif (la fusée attend le décollage).
- Actionneur actif (séparation commandée) ou inactif (séparation non commandée).

En outre, pour tous les tests de validation, nous avons la possibilité de brancher un module d'affichage *externe* qui permet de visualiser en temps réel l'évolution des différents paramètres.

## 5. Alimentation

Le séquenceur doit avoir la puissance nécessaire pour déclencher le mécanisme de séparation. Tous les composants de la carte électronique sont alimentés en 5V et la consommation de la carte est de l'ordre de 30 mA. L'électrovanne fonctionne sous 12 Vcc pour une consommation de 1,2 W (100 mA). Afin d'obtenir une tension de 12V fiable, nous avons décidé d'utiliser deux piles 9 V en série et de réguler la tension par l'intermédiaire de régulateurs 7812 et 7805.



Carte séquenceur



---

## **LA CAMPAGNE DE LANCEMENT**

---

### **1. Simulation sous le logiciel TRAJEC**

L'ANSTJ met à notre disposition un logiciel appelé TRAJEC qui permet de simuler le vol de la fusée en fonction des caractéristiques mécaniques. Grâce à ce logiciel, il est possible d'obtenir rapidement les principales caractéristiques du vol, notamment au niveau de la stabilité : vitesse en sortie de rampe, portance, marge statique, ...

Il est également possible de déterminer le temps de culmination avec une assez bonne précision et ainsi ajuster le séquenceur.

### **2. Les contrôles**

Avant le lancement, de nombreux contrôles sont effectués par des personnes compétentes pour vérifier le respect des règles du cahier des charges. Dans le cas où la fusée est conforme (aussi bien au niveau de la conception que de la stabilité), une fiche de contrôle est émise et la fusée est déclarée apte au vol. Nous n'avons pas connu de problèmes majeurs durant cette phase de qualification.

### **3. Samedi 4 Août 2002 : le lancement**

Une fois les étapes de contrôle passées avec succès, le décollage est proche. Cependant, il ne faut pas se précipiter et les derniers préparatifs réclament encore pas mal d'application. Après de longs jours de préparation, pas question de négliger le moindre détail qui pourrait faire tout capoter. Nous avons donc suivi à la lettre la chronologie préalablement établie.



Nous sommes donc arrivés à la première heure sur le site de lancement avec une chronologie parfaitement définie. Cependant, nous avons rencontrés quelques difficultés pendant la phase de préparation en « tente club ». Les principales difficultés provenant d'un court-circuit sur l'alimentation de l'expérience. Nous ne sommes donc descendus sur rampe « Menhir » qu'en fin de matinée ...

Depuis la rampe de lancement, les premiers tests d'émission HF conduisirent à une réception très faible et saccadé. L'ensemble de la chaîne de télémétrie fut difficile à mettre en place.





Lors de la mise en place du propulseur, le pyrotechnicien applique un couple de serrage relativement important et de par la conception de notre système de séparation, cet effort a provoqué l'ouverture de la fusée. En effet, le couple de serrage du propulseur à dévissé la bague piston ce qui a perturbé l'équilibre statique du système. Nous avons donc du remonter en tente club pour vérifier le système de séparation et conditionner à nouveau la fusée pour le vol. Ces vérifications, souvent interrompues par d'autres lancements, ont pris une partie de l'après-midi. Nous ne sommes redescendus en rampe « Menhir » qu'en fin de soirée.

Le décollage est un plaisir intense mais très bref puisque la séparation est source de nombreuses craintes. Surtout à l'altitude où est montée la fusée, environ 1200 mètres, il est impossible de savoir si la séparation a fonctionné jusqu'à l'instant où l'on peut apercevoir un magnifique parachute blanc dans le ciel. Ce parachute fut alors le signe de la délivrance pour toute l'équipe.

#### 4. Résultats de l'expérience

Alors que la réception depuis la rampe était très faible, nous avons totalement perdu le signal au décollage.

Nous ne savons pas précisément pourquoi, au cours du vol d'EfrEst nous n'avons reçu aucune image vidéo ni entendu aucun son venant de la fusée. Pourtant, lors des tests d'avant vol sur le R3, nous avions une réception très correcte. Nous avons plusieurs hypothèses :

- Au début nous avons pensé à un problème lié aux alimentations électroniques. Mais il s'est avéré que ce n'était pas cela après des tests sur des alimentations de laboratoire.
- Un problème avec l'étage de puissance. L'émetteur a été réalisé par M. Nierveze un radio-amateur que nous tenons encore une fois à remercier pour son travail et son aide. Nous n'étions pas en mesure de réparer l'émetteur ou le récepteur en cas de dysfonctionnement. Nous connaissions seulement le principe de fonctionnement. Il y a peut être eu un problème au niveau de l'étage de puissance qui fait que l'émission n'était pas assez puissante pour être reçue là où nous étions.
- La fréquence de 1,2 GHz oblige une émission très directionnelle. Il se peut qu'à la distance où nous étions, nous étions trop éloignés et pas dans l'axe pour obtenir une émission correcte.
- L'hypothèse la plus probable est la suivante : M. Nierveze nous a indiqué que la réception des quelques bouffées de synchro que nous avions sur le site de lancement était le cas type d'une réception avec un niveau FM insuffisant. Lorsque le niveau est trop juste il y a comme un effet écreteur qui très vite empêche toute réception. Une modification de la chaîne de réception (autre pré-ampli de réception, récepteur, ...) aurait pu permettre une bien meilleure réception.





Nous ne savons pas ce qui est réellement la cause du problème, peut-être une somme de petit problème ? Mais nous savons que nous avons fait au moins deux erreurs :

- Nous aurions dû tester l'ensemble de l'émission / réception avec l'étage de puissance sur une grande distance avant de partir pour Millau. Nous avons seulement testé l'émetteur sans l'étage de puissance en mettant le récepteur juste à côté. Si le problème que nous avons rencontré vient du fait de la fréquence élevée, nous aurions pu nous en apercevoir.
- La deuxième erreur a été de ne pas plus nous intéresser à l'émetteur et au récepteur fait par M. Nierveze. Du fait de son absence sur le festival, nous aurions dû connaître la partie télémétrie afin de pouvoir réparer toute panne.





---

---

## *CONCLUSION*

---

---

Pour la majeure partie de l'équipe, cette fusée constituait la première Fusex. Elle a permis à ces personnes de voir la gestion d'un projet comportant de la mécanique et des expériences électroniques embarquées. Malgré le non-fonctionnement de la retransmission vidéo, ce lancement est une réussite au niveau mécanique et électronique de commande : Nous avons pu récupérer la fusée intacte et la caméra a bien pivoté comme prévu. De plus, l'un des challenges de cette fusée consistait à réaliser une fusée en commun entre les deux clubs Aéro-EFREI et ESO, afin de fêter leur dixième année d'existence. De ce côté là, le projet fut une parfaite réussite.

Même si nous sommes bien sûr très déçus de n'être pas arrivés à filmer le vol de notre fusée, nous sommes heureux d'avoir pu mener ce projet jusqu'à son terme. L'échec de la télémétrie nous pousse à recommencer pour enfin arriver à retransmettre de la vidéo et faire parler une fusée !





---

## ***SOMMAIRE DES ANNEXES***

---

- Annexe 1 : Crhonomie
- Annexe 2 : Schéma électronique : Minuteries
- Annexe 3 : Schéma électronique : Commande du servo
- Annexe 4 : Plan Mécanique : Bague Ailerons
- Annexe 5 : Plan Mécanique : Bague de Poussée
- Annexe 6 : Plan mécanique : Bague Séparation Inférieure
- Annexe 7 : Plan mécanique : Bague Séparation Supérieure
- Annexe 8 : Plan mécanique : Piston EfrEst
- Annexe 9 : Plan mécanique : Séparation
- Annexe10: Plan mécanique : Bague Inter Etage



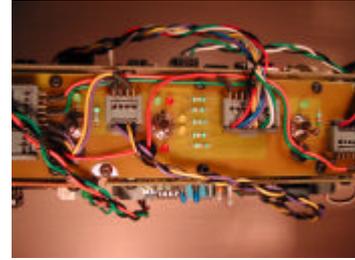
# Chronologie EFREST

Resp.: Marielle

## PEAU DEMONTEE, BAGUE SEPA SANS LES PILES

### Arrivée des membres en tente club et premières vérifications

- H - 87 [Sébastien](#) vérification du branchement des 17 connecteurs STOCKO
- H - 85 [Sébastien](#) vérification des pré réglages séquenceur numérique (cf. photo séquenceur)
- H - 84 [Alexandre](#) vérification de la connexion de l'émetteur (antenne, vidéo, son)
- H - 83 [Alexandre](#) vérification de la connexion du jumper ISD
- H - 82 [Thibaut](#) mise en place des batteries (6x9V + 10x1,5V R14 interne)
- H - 79 [Sébastien](#) enlever la protection de la caméra
- H - 78 [Richard](#) mise en place de la peau en laissant la durite sortie (6 vis + protection caméra)



### Préparation partie supérieure groupe 1 :

Groupe 1: Sébastien, Thibaut, Jean-Pascal, Alexandre, Marielle

#### JACKS EN PLACE

- H - 74 [Sébastien](#) test allumage séquenceur  
allumage LED verte  
allumage LED rouge pendant 1 seconde
- H - 73 [Sébastien](#) vérification position interrupteur contrôle servo en GAUCHE
- H - 72 [Sébastien](#) test allumage contrôle servo + ISD  
allumage LED verte  
caméra en position STAND-BY (verticale)
- H - 71 [Sébastien](#) basculement interrupteurs contrôles servo en position vol
- H - 70 [Sébastien](#) sans mettre la partie inférieur, sans les billes, remplissage du vérin (< 5 bars)
- H - 68 [Sébastien](#) test séquenceur + ISD  
déclenchement accéléro => allumage LED orange 1  
arrachage jack (t0) => allumage LED orange 2  
à t0 + 15" => allumage LED rouge EV + remontée vérin  
à t0 + 23" => caméra en position haute  
à t0 + 60" => extinction LED verte ISD
- H - 66 [Sébastien](#) basculement interrupteur contrôle servo en position STAND-BY
- H - 65 [Sébastien](#) interrupteurs sur OFF
- H - 64 [Laurent](#) assemblage de la fusée (partie supérieure et inférieure)

[Laurent](#)

### Préparation partie inférieure groupe 2 :

Groupe 2: Laurent, Richard

Mise en place du parachute

[Laurent](#)

fin de la mise en place du parachute

### H - 58 Descente en rampe de l'équipe rampe avec le matériel suivant :

Groupe A: Laurent, Richard, Sébastien, Thibaut, Marielle

- pompe
- tuyau bleu, clapet anti-retour
- adaptateur tuyau pompe
- clé BTR, vis M3 6, 8, 12
- alim externe
- pince coupante, pince plate
- billes
- vis
- bague ailerons
- jacks
- ficelle d'attache des jacks
- tube protection jacks
- multimètre

#### Test compatibilité rampe

- H - 48 test compatibilité rampe
- H - 47
- H - 46
- H - 45
- H - 43
- H - 42
- H - 41
- H - 38 fin compatibilité rampe

#### Test télémesure

- H - 37 branchement jack alim externe
- H - 36 allumage expérience (3eme interrupteur)
- H - 35 allumage télémesure (le signaler par radio)
- H - 34 demande confirmation
- H - 32 arrêt télémesure
- H - 31 débrancher jack alim externe

### 2 PERSONNES

- H - 30 [Pyrotechnicien](#) mise en place du propulseur
- H - 27 [Richard](#) mise en place de la bague aileron
- H - 25 [Richard](#) mise en rampe
- H - 21 [Richard](#) regonflage du vérin
- H - 19 [Richard](#) rentrer la durite dans le corps
- H - 17 [Sébastien](#) mise en place des jacks
- H - 16 [Sébastien](#) attache des jacks à la rampe
- H - 13 [Sébastien](#) basculer caméra en position FLIGHT (vers le bas)
- H - 12 [Sébastien](#) demande autorisation allumage expérience
- H - 11 [Sébastien](#) allumage séquenceur + contrôle servo  
1 LED verte contrôle servo  
1 LED verte séquenceur  
allumage LED rouge (1 seconde)

- H - 10 [Pyrotechnicien](#) mise en site de la rampe  
attente 1'40" avant temps de déclenchement

- H - 2 [Sébastien](#) allumage télémesure (le signaler par radio)
- H - 1 [Sébastien](#) demande confirmation réception

### 0 PERSONNES

- H - 0 dégagement zone de tir
- H + 3 [EfrEst](#) atterissage

### Equipe Télém vers camion télémesure

Groupe B: Jean-Pascal, Alexandre

- cassette VHS
- magnétoscope
- poste de télévision
- prise péritel
- boîtier JP + câbles + télécommandes
- câble 3m coax+alim torsadée
- antenne+pré ampli
- tournevis magique

#### Déploiement de la chaîne de réception

- [Jean-Pascal](#) connexion boîtier JPJ au secteur
- [Jean-Pascal](#) connexion magnétoscope, TV au boîtier JPJ
- [Jean-Pascal](#) mise en place câble 10m torsadé
- [Jean-Pascal](#) connexion antenne
- [Jean-Pascal](#) allumage boîtier JPJ
- [Jean-Pascal](#) allumage TV, magnétoscope, décodeur satellite
- [Jean-Pascal](#) décodeur satellite sur canal 1

[Jean-Pascal](#) cassette VHS

[Jean-Pascal](#) attente essai télém

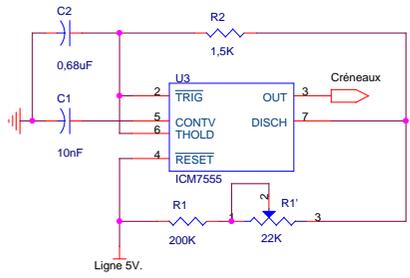
[Jean-Pascal](#) essai Télém (début enregistrement)

[Jean-Pascal](#) arrêt enregistrement

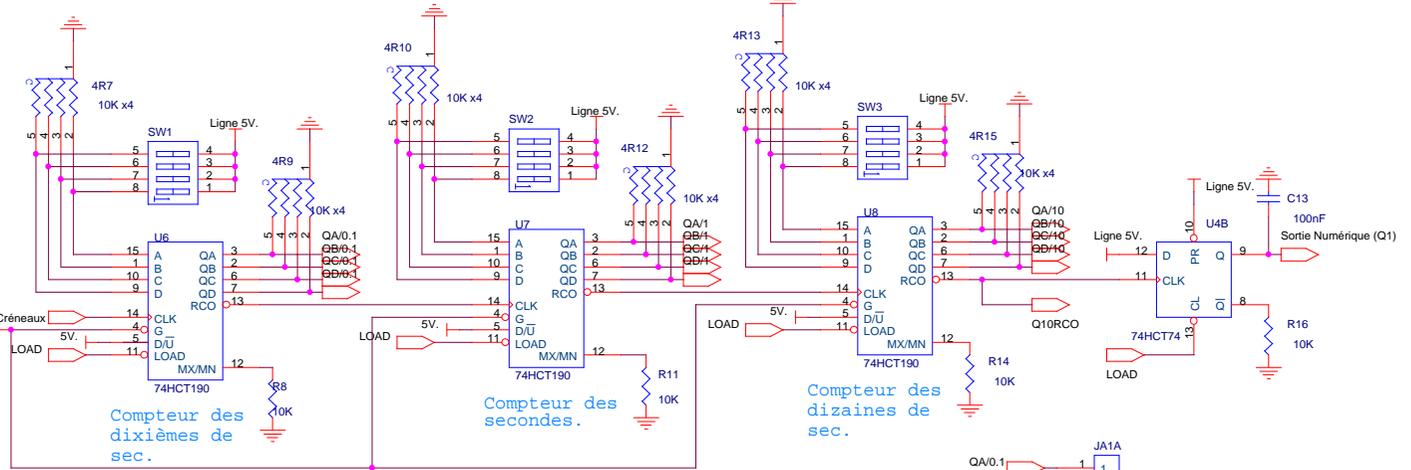
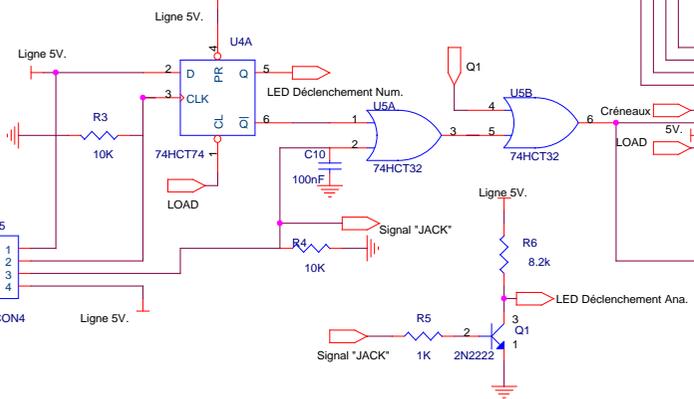
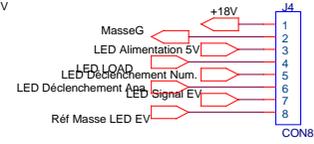
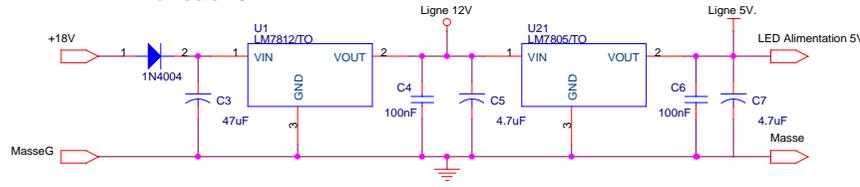
[Jean-Pascal](#) début enregistrement

[Jean-Pascal](#) arrêt enregistrement

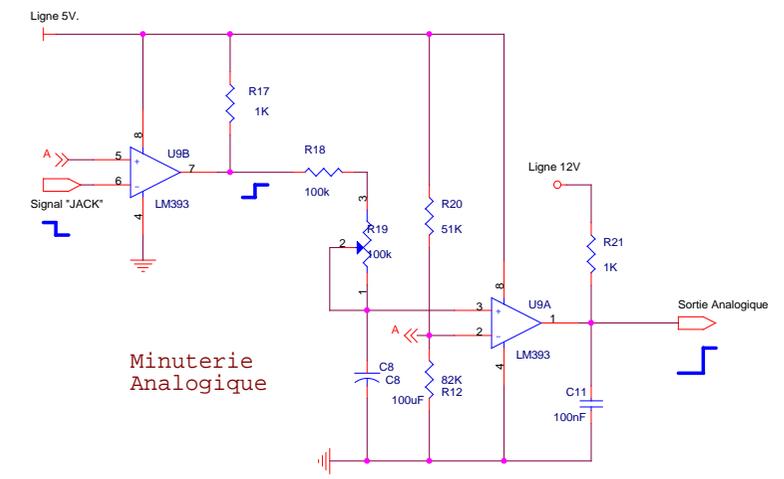
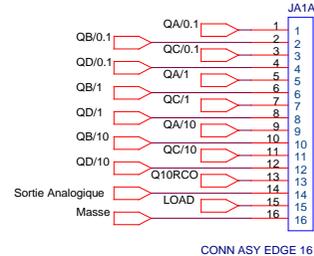
### Générateur de créneaux



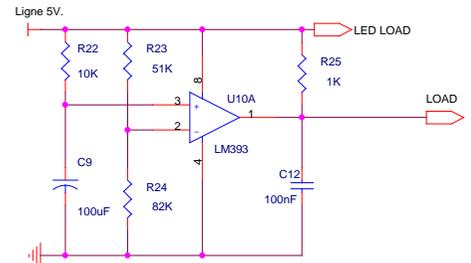
### Alimentation



### Minuterie Numérique

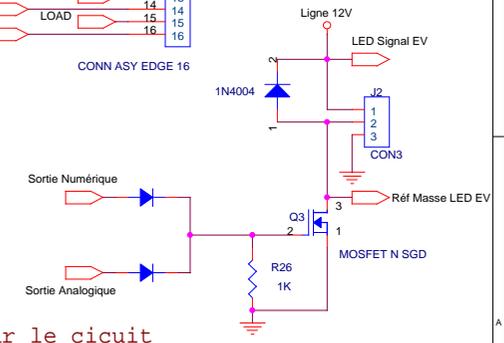


### Minuterie Analogique

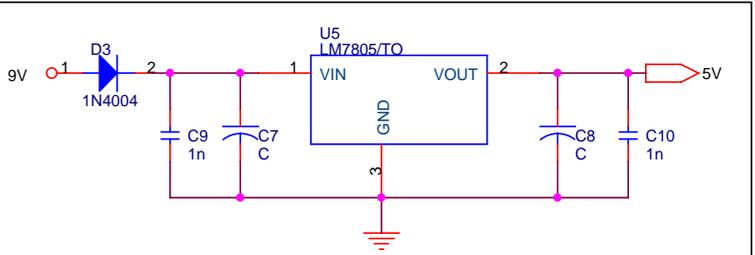
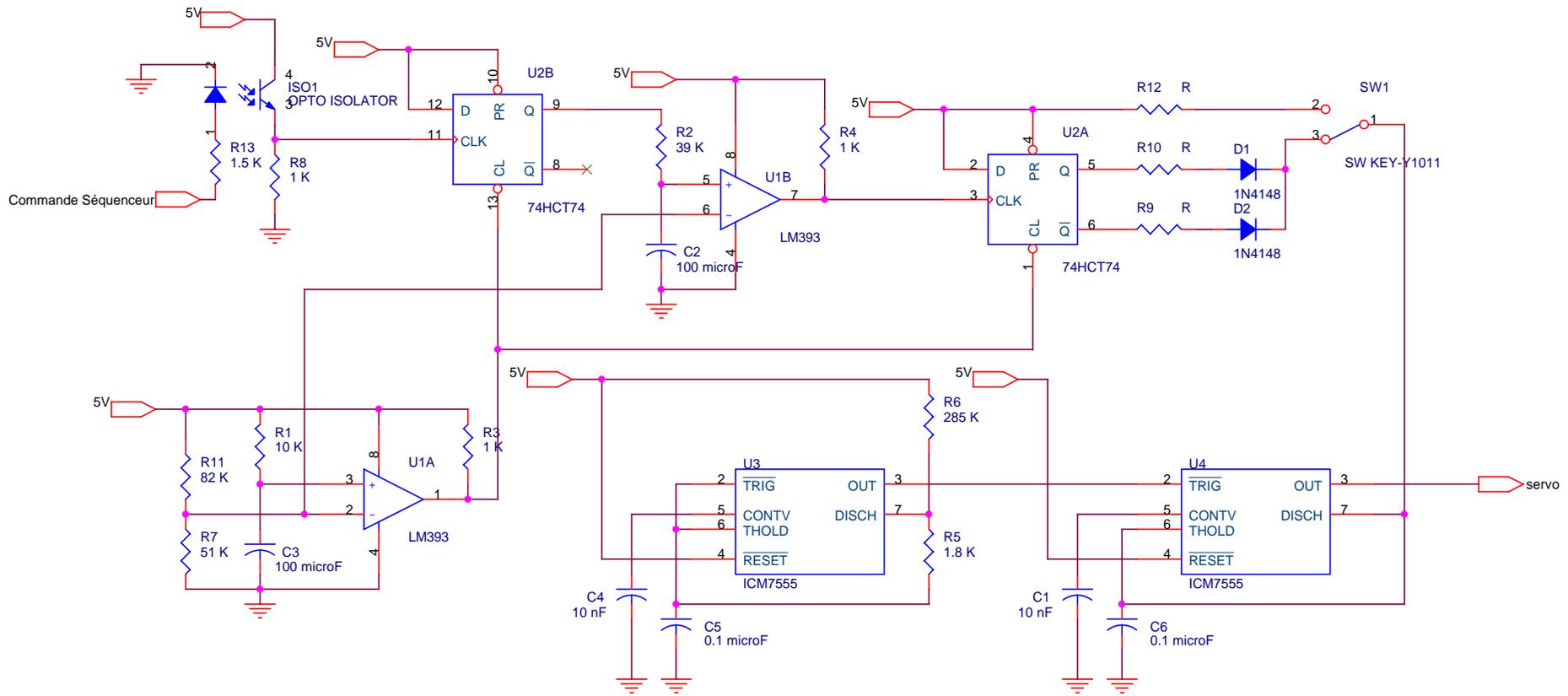


### "LOAD" de la minuterie Numérique

### Sortie sur le circuit de puissance

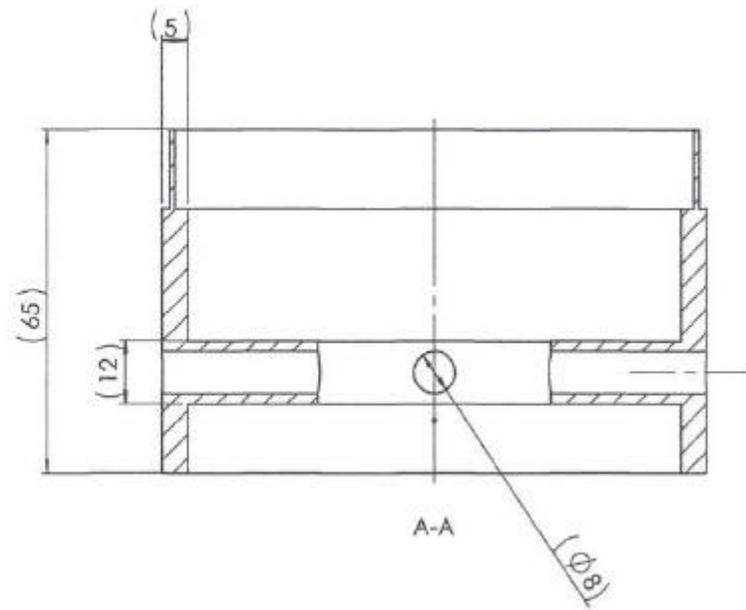
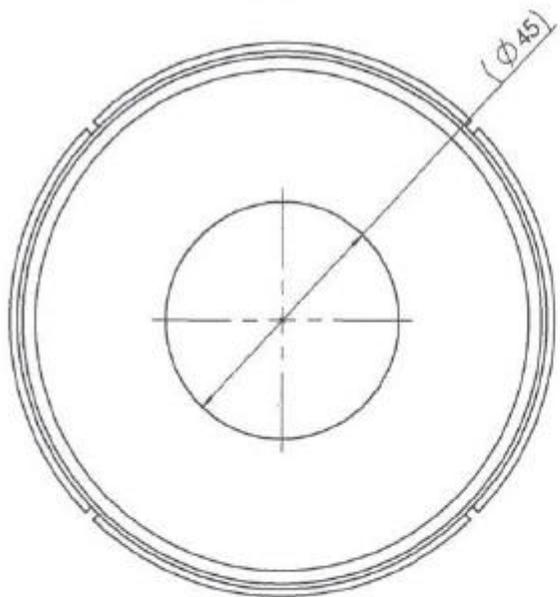
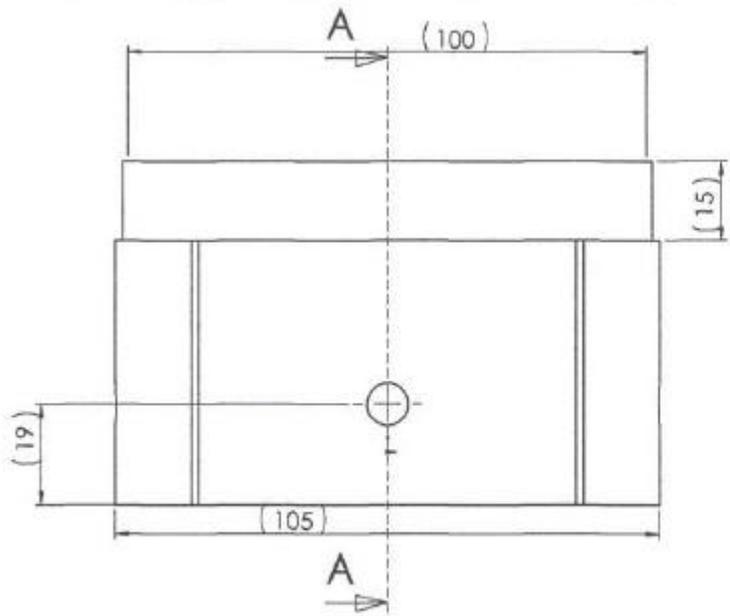


Title		EfrEst - Minuteries	
Size	A3	Document Number	
Date:	Wednesday, May 15, 2002	Sheet	1 of 1



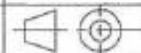
Alimentation

EFREST		
Title		Carte commande servomoteur ESO
Size	Document Number	Rev
A4		
Date:	Thursday, March 28, 2002	Sheet 1 of 1



Licence d'éducation SolidWorks  
A titre éducatif uniquement

Echelle  
2:3

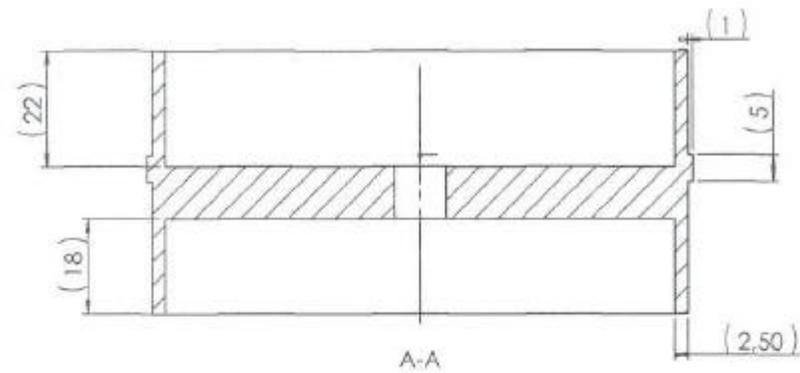
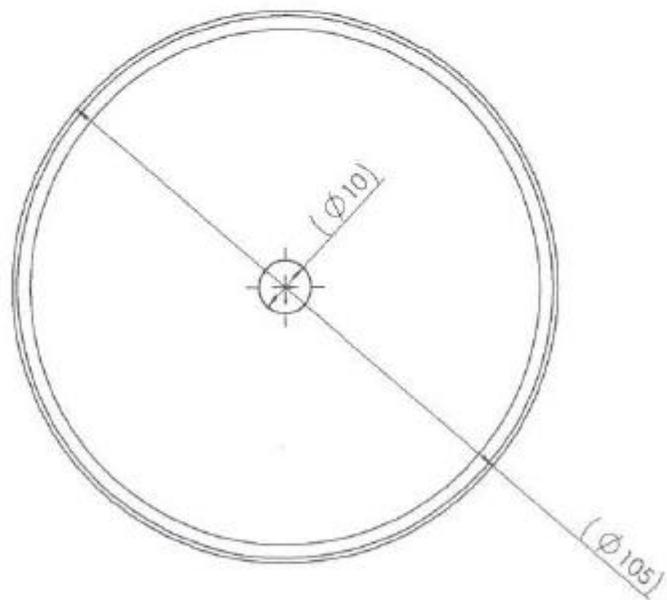
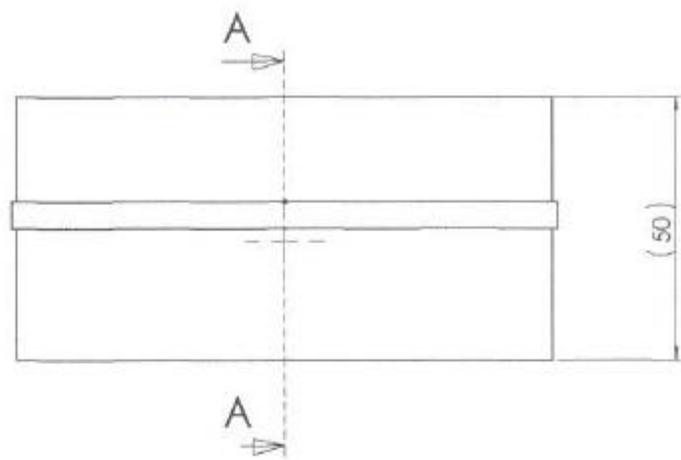


**Bague Aileron**

EfrEst

ESO

A4H



Licence d'éducation SolidWorks  
A titre éducatif uniquement

Echelle  
2:3



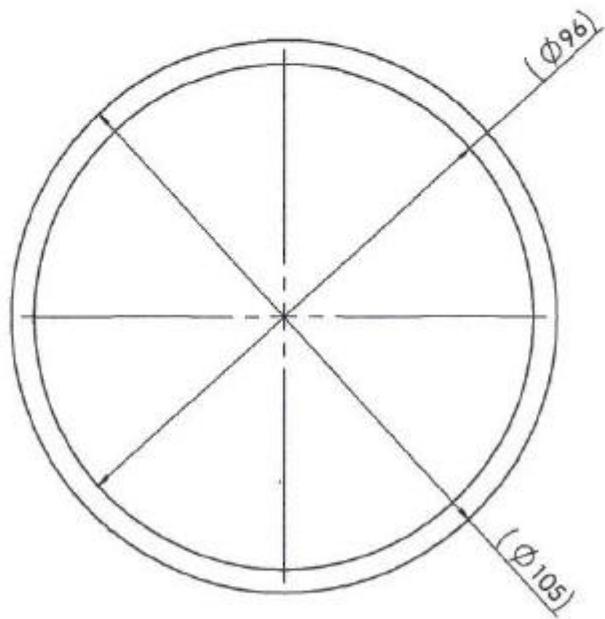
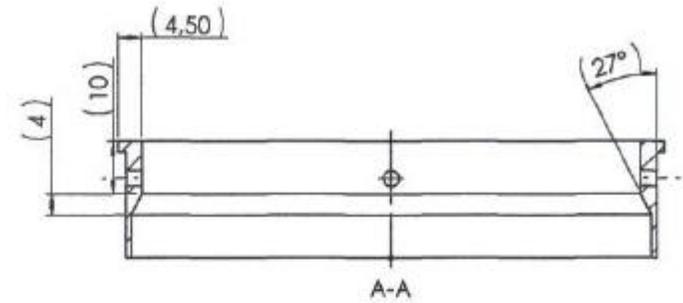
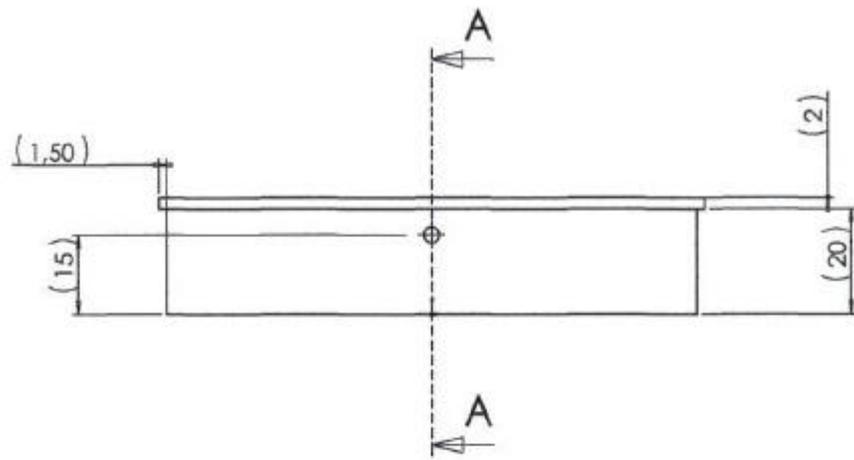
**Bague de Poussée**

EfrEst

ESO

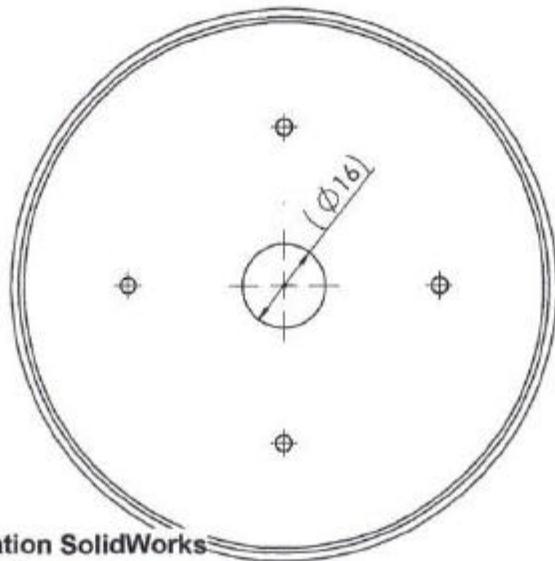
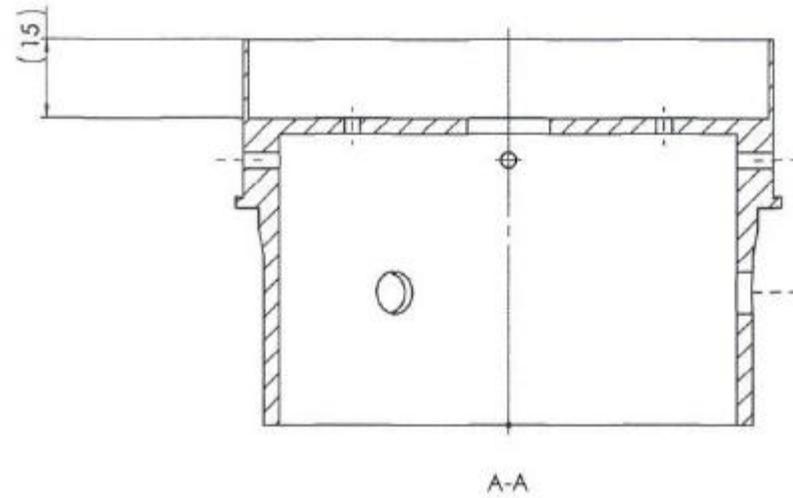
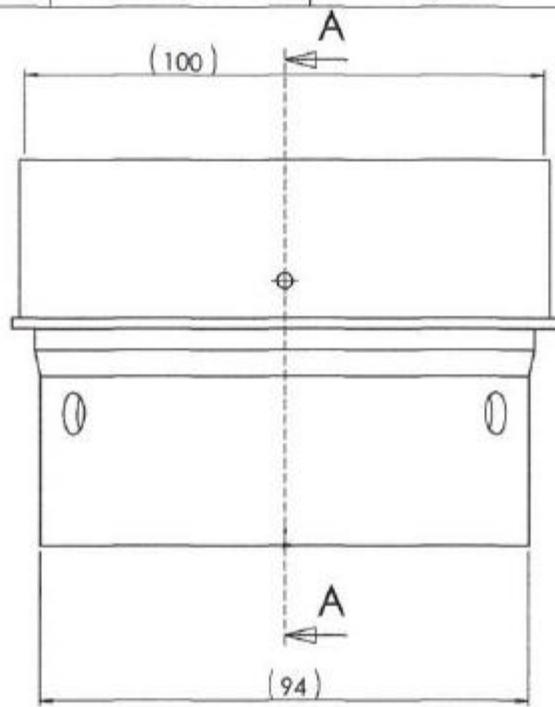
A4H

Dessiné par :



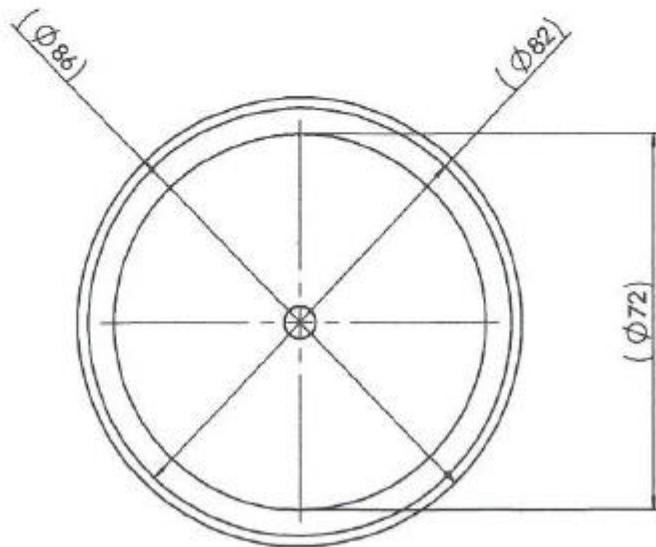
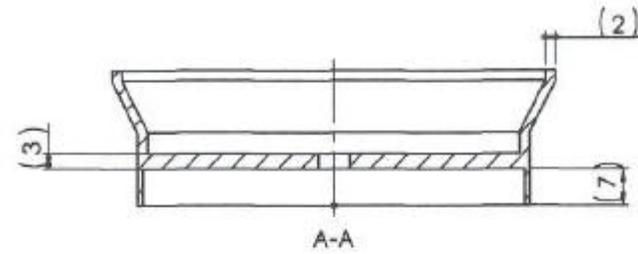
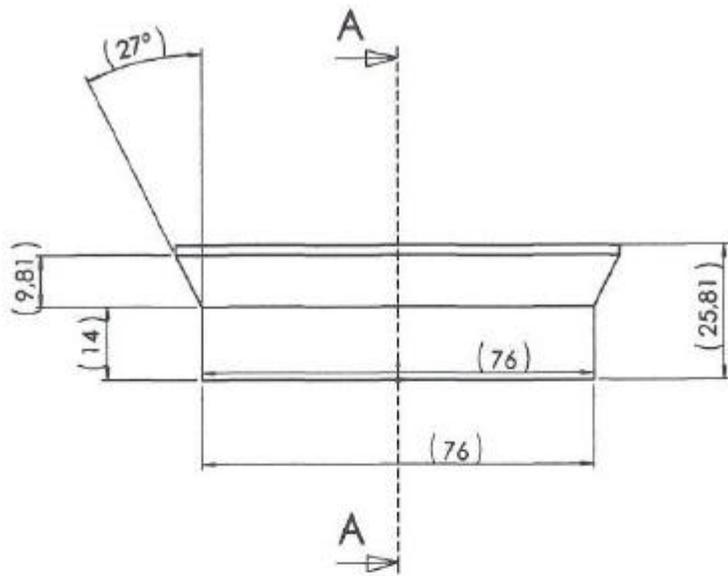
Licence d'éducation SolidWorks  
A titre éducatif uniquement

	<b>Echelle</b> <b>2:3</b>	<b>Bague Séparation Inférieure</b>	
		<b>EfrEst</b>	
		<b>ESO</b>	
	<b>A4H</b>		



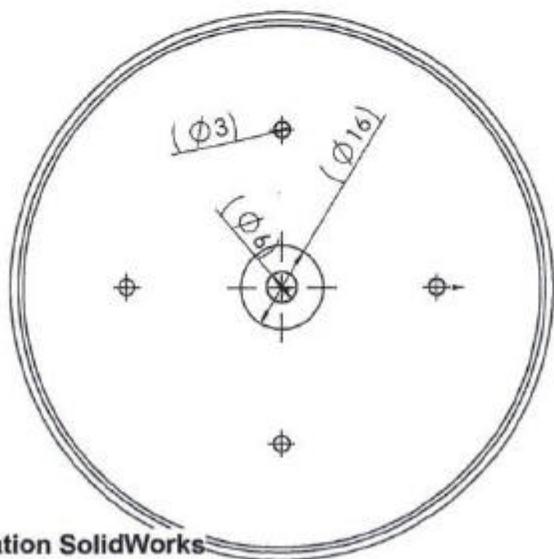
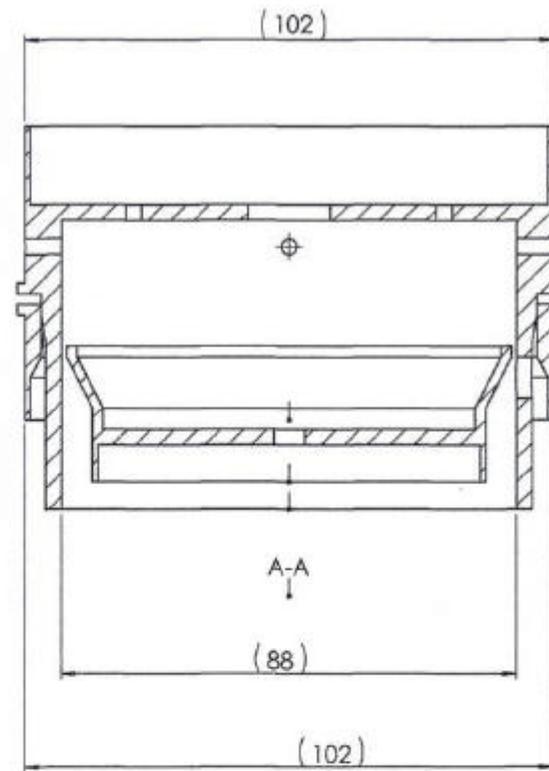
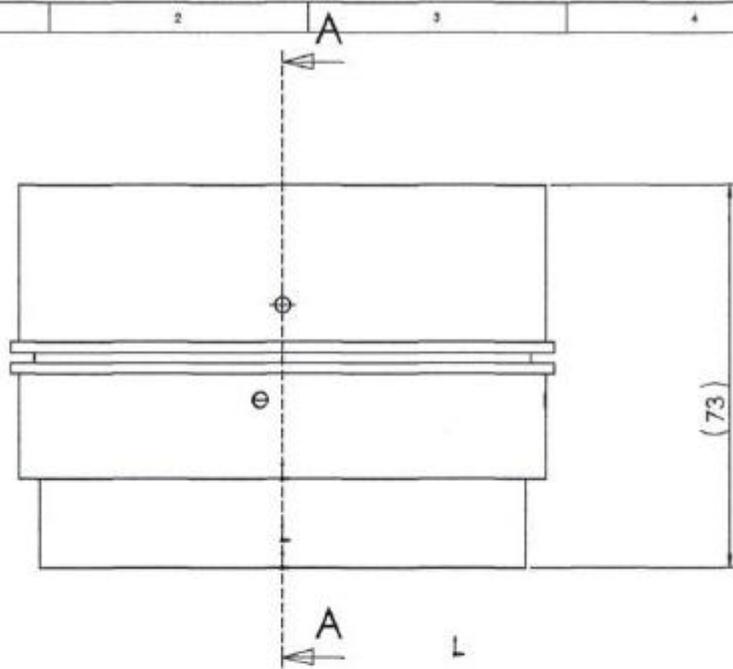
Licence d'éducation SolidWorks  
A titre éducatif uniquement

	<b>Echelle</b> 2:3	<b>Bague Séparation Supérieure</b>	
		EfrEst	
		<b>ESTACA</b>	
	<b>A4H</b>		



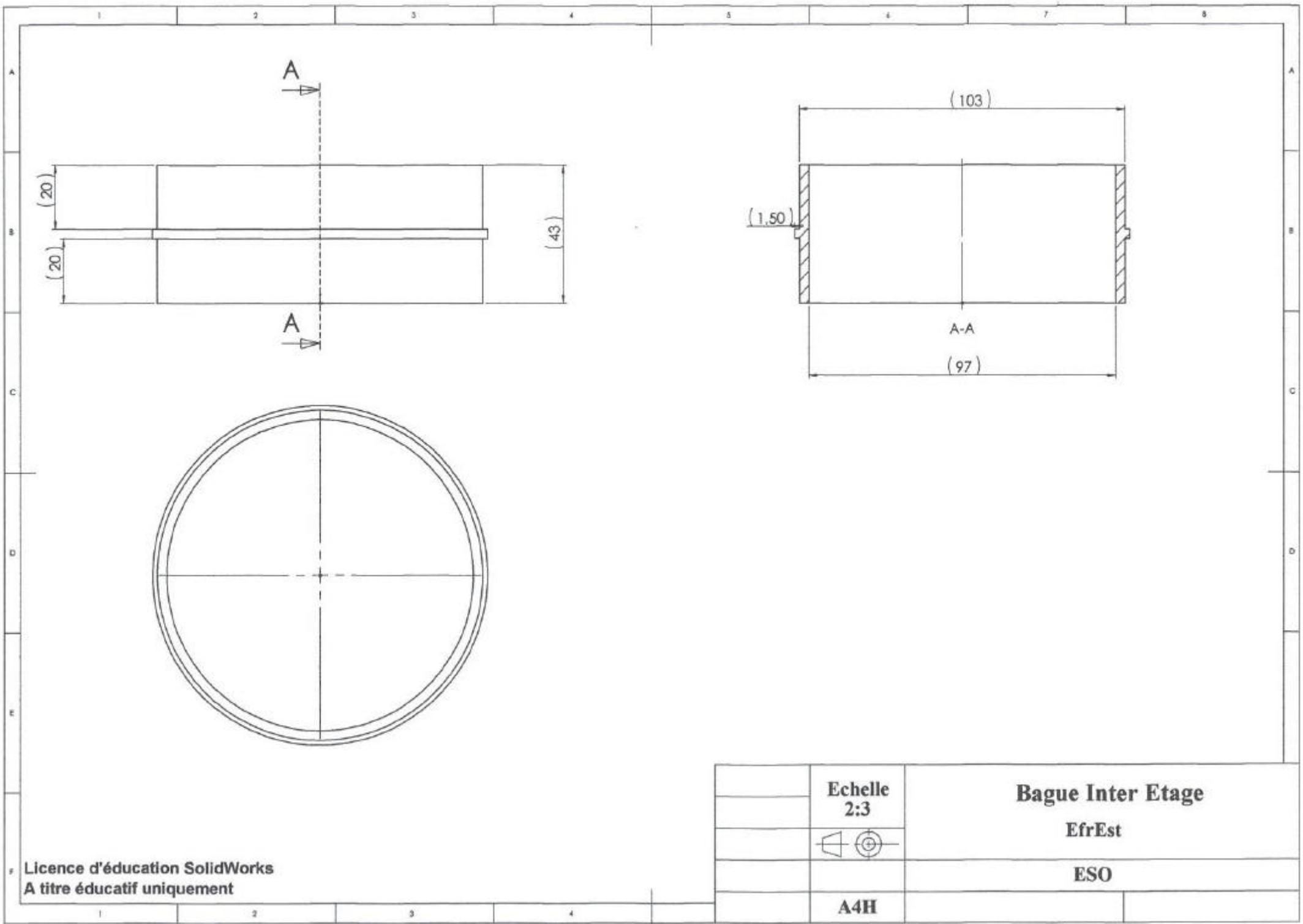
Licence d'éducation SolidWorks  
A titre éducatif uniquement

	<b>Echelle</b> 2:3	<b>Piston EfrEst</b>	
		<b>EfrEst</b>	
		<b>ESO</b>	
	<b>A4H</b>	Dessiné par : <b>Ludovic Durand</b>	



Licence d'éducation SolidWorks  
A titre éducatif uniquement

	<b>Echelle</b> 2:3	<b>Séparation</b>	
		EfrEst	
		ESO	
	<b>A4H</b>		



Licence d'éducation SolidWorks  
 A titre éducatif uniquement

	<b>Echelle</b> 2:3	<b>Bague Inter Etage</b>	
		<b>EfrEst</b>	
		<b>ESO</b>	
	<b>A4H</b>		