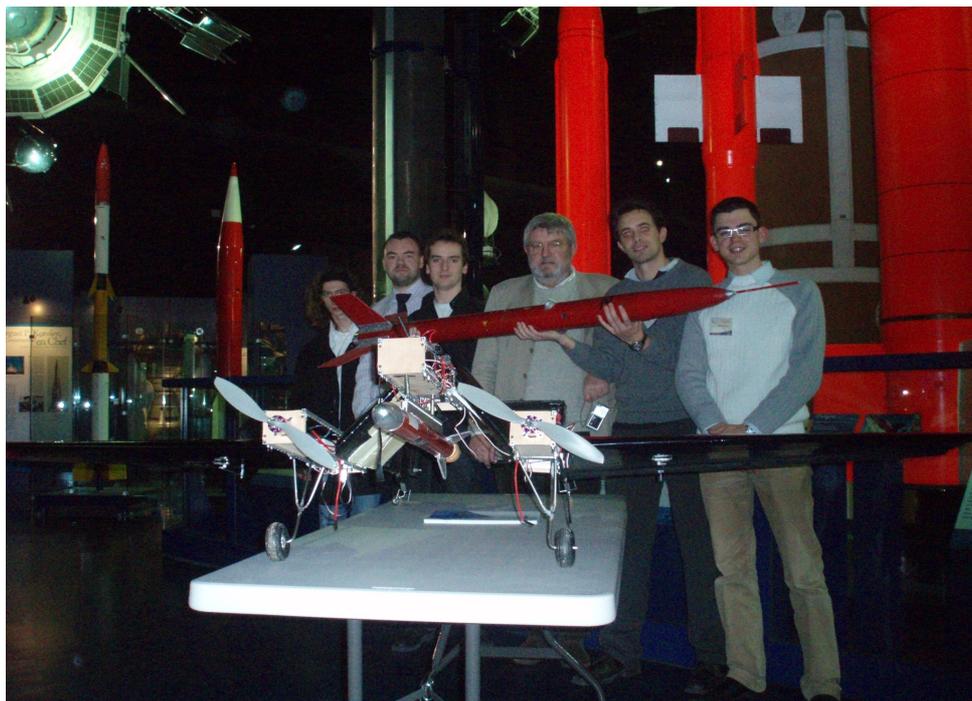


*Club Swift Tuttle Space*

**"Projet Chevalier Noir"  
Dossier de sauvegarde**



**Auteurs** : Laurent BOIREAU, Nicolas LANCIAUX

**Date** : 24/03/2008

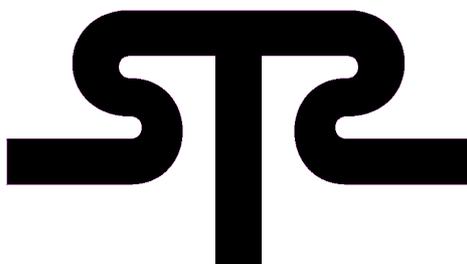
**Destinataires** : STS, CNES, Planète Sciences

## *Intitulé*

Dossier sauvegarde pour un largage aéroporté d'une minifusée depuis un avion d'aéromodélisme assisté au pilotage

### **Le Club Swift Tuttle Space**

Le club STS est une association a but non lucratif qui permet depuis plus de dix ans à ses membres de mettre en oeuvre des projets aérospatiaux (microfusées, minifusées, fusées expérimentales, ballons sondes, expériences en micropesanteur).



**Club Swift Tuttle Space**

<http://swift.chez-alice.fr>

[swifttuttle@caramail.com](mailto:swifttuttle@caramail.com)

06.26.97.23.56

Chez Monsieur Roques

12, rue Jean Jaurès

91300 Massy



*Les quatre fusées expérimentales du club Swift Tuttle Space  
"Supernova", "Kamplum", "LaïKa", "Albina"*

## *Sommaire*

<u>Intitulé.....</u>	<u>3</u>
<u>Sommaire.....</u>	<u>4</u>
<u>Lexique.....</u>	<u>5</u>
<u>Abréviations.....</u>	<u>5</u>
<u>Définitions.....</u>	<u>5</u>
<u>Présentation de quelques composants et notions élémentaires.....</u>	<u>6</u>
<u>Introduction.....</u>	<u>9</u>
<u>Description du système.....</u>	<u>10</u>
<u>Description sommaire du porteur.....</u>	<u>10</u>
<u>Description du système de commande.....</u>	<u>12</u>
<u>Liaisons radio.....</u>	<u>12</u>
<u>Description de l'avionique et système électrique du Chevalier Noir.....</u>	<u>13</u>
<u>Alimentation électrique par le circuit principal :.....</u>	<u>13</u>
<u>Alimentation du récepteur et des servomoteurs de vol :.....</u>	<u>14</u>
<u>Alimentation de sauvegarde (parachute porteur de l'avion et largage fusée).....</u>	<u>14</u>
<u>Alimentation Micav.....</u>	<u>14</u>
<u>Description du terrain.....</u>	<u>14</u>
<u>Description d'une séquence de largage aéroporté sous avion.....</u>	<u>16</u>
<u>Emplacement des postes de contrôle.....</u>	<u>17</u>
<u>Description des mesures de sécurité supplémentaires prises par rapport au lancement depuis une rampe au sol.....</u>	<u>17</u>
<u>Description de la rampe de lancement aéroportée :.....</u>	<u>18</u>
<u>Etude sauvegarde.....</u>	<u>19</u>
<u>Description du système avion, aspects commande.....</u>	<u>19</u>
<u>Philosophie générale.....</u>	<u>22</u>
<u>Evènements redoutés.....</u>	<u>23</u>
<u>Arbre de défaillance :.....</u>	<u>26</u>
<u>Minifusée Xcalibur.....</u>	<u>28</u>
<u>Gabarit de vol.....</u>	<u>28</u>
<u>Etude de la minifusée.....</u>	<u>28</u>
<u>Qualification :.....</u>	<u>31</u>
<u>Essais au sol.....</u>	<u>31</u>
<u>Tests au sol en qualification campagne.....</u>	<u>31</u>
<u>Démonstrations en vol en qualification campagne.....</u>	<u>32</u>
<u>Conclusions sur la sauvegarde.....</u>	<u>32</u>
<u>Annexe 1 : checklist pré-vol.....</u>	<u>32</u>
<u>Annexe 2 : Mise en place de la minifusée et de la charge pyrotechnique sur l'avion porteur.....</u>	<u>34</u>
<u>Annexe 3 : processeur embarqué Micav.....</u>	<u>36</u>
<u>Annexe 4 : Station sol PRST.....</u>	<u>38</u>
<u>Annexe 5 : Commutateur de servos.....</u>	<u>41</u>
<u>Annexe 6 : Ventouse électro-magnétique.....</u>	<u>43</u>
<u>Annexe 7 : Parachutes porteur.....</u>	<u>44</u>

## *Lexique*

### **Abréviations.**

Barrière Mécanique : **BM** (exemple : une goupille)

Interrupteur Electrique : **IE** (exemple : un transistor commandé par un microcontrôleur)

Interrupteur Electro-Mécanique : **IEM**, désigne ici un interrupteur mécanique (relais) actionné par un servomoteur

**LiPo** : Lithium-Polymères ; nom donné a une catégorie de batteries rechargeable constituées par ces éléments

### **Définitions.**

**Avion, porteur** : on parle d'un avion d'aéromodélisme, le Chevalier Noir

**MICAV** (pour MICRo AVionique) : est une carte d'électronique embarquée comprenant des capteurs, un processeur et un modem. MICAV 2.0 est la carte utilisée sur Chevalier Noir est une marque déposé. Elle est produite par la société Polyvionics ([www.polyvionics.com](http://www.polyvionics.com)).

**Chevalier Noir** : Nom de l'avion créé et fabriqué par le club STS bénéficiant d'une assistance au vol par la carte MICAV 2.0 et ayant pour objet le lancement aéroporté d'une minifusée au cours de la campagne de la Courtine de 2008.

**XCalibur** : Nom de la minifusée portée puis lancée en vol par l'avion Chevalier Noir. Elle est conçue et fabriquée par le club STS

**Trim (par radio-commande)** : Dispositif qui permet de régler les gouvernes en vol. Correspond aux flettners ou tabs de l'aviation grandeur.

**Emetteurs et récepteurs de contrôle :**

**Segment sol :**

**PC station sol** : Emetteur – récepteur station sol (liaison numérique bidirectionnelle par modems entre le PC station sol et l'avionique Micav, à 2.4GHz ou 868MHz). Un logiciel professionnel (PRST, Instrument Control Sweden, <http://www.instrumentcontrol.se/>) est utilisé pour visualiser l'état de l'avion, et le contrôler en mode assisté. Des captures d'écran et une description de la station sol PRST sont données en annexe.

**RCVol** : Emetteur, radiocommande de vol permettant le pilotage du porteur. Bande aéromodélisme (41MHz)

**RCSauvegarde (RCS)** : Radiocommande dédiée à la sauvegarde permettant l'arrêt des moteurs et

l'ouverture du parachute du porteur, ainsi que l'allumage et le largage minifusée. Bande aéromodélisme (72MHz), fréquence distincte de la précédente.

**Segment bord :**

MICAV : Emetteur-récepteur (modem) numérique, intégré dans la carte avionique.

RVol : Récepteur radiocommande vol.

RSauvegarde (RS) : Récepteur radiocommande sauvegarde

## **Présentation de quelques composants et notions élémentaires**

Les éléments suivants constituent les briques de bases de l'avionique embarquée.

**Fusée expérimentale (fusex) :** désigne une fusée expérimentale. Masse de l'ordre de 10kg, hauteur de l'ordre de 2m, culmination à environ 1000m.

**Minifusée :** fusée de 1 à 2 kg (typiquement), 1m de haut, culmination à environ 150m.

**Servomoteurs :** actionneurs asservis et commandés par les radiocommandes RCVol et RCS.

L'alimentation est fournie par les récepteurs radio sur lesquels se branchent les servos. La consigne est transmise sous forme de signaux PWM.

**Basculeur :** dispositif permettant de commuter automatiquement entre deux sources d'alimentation en cas de défaillance d'une des deux sources. Ils sont employés sur Chevalier Noir afin de garantir l'alimentation de dispositifs critiques (allumeur, récepteurs vol et sauvegarde, et donc servomoteurs, ventouses électromagnétiques) en cas de défaillance du bus principal.

Le basculeur commute automatiquement en cas de perte de tension sur la source nominale (bus principal). En cas de perte de tension sur la batterie redondante, il alimente le composant en puisant sur les deux sources. Il garantit l'alimentation ininterrompue du système tant que l'une au moins des batteries connectées (nominale et redondante) ou les deux cumulées sont capables de fournir la charge demandée. En particulier, il a été vérifié que la commutation sur l'alimentation d'un récepteur n'entraîne pas de transitoire sur les servomoteurs branchés sur ce récepteur.

**PWM Pulse Width modulation :** modulation par largeur d'impulsion. Format d'envoi de consignes aux servos. Il s'agit de créneaux de longueur 1 à 2 ms, envoyés toutes les 20 ms environ. La largeur du créneau correspond au débattement commandé au servo.

**Commutateur de servos.** Les servomoteurs de vol (gouvernes) peuvent être commandés par la carte Micav, qui génère alors les signaux PWM de commande, ou par le récepteur de vol RVol. Le commutateur permet de basculer entre ces deux sources. Il est commandé par RCVol en actionnant un interrupteur : la largeur du créneau PWM de la voie correspondante passe alors de 1 à 2 ms, permettant de choisir la source des autres commandes. Sur Chevalier Noir, nous avons retenu un composant du commerce : <http://reactivetechologies.com/RxMux.html>, décrit en annexe.

L'alimentation des servos est fournie dans tous les cas par le récepteur RVol.

**Ventouse électromagnétique :** Il s'agit d'un aimant permanent entouré d'un électro-aimant. L'objet

à bloquer doit simplement être métallique. Lorsque l'on souhaite le libérer, on envoie un courant dans l'électro-aimant, dont le champ magnétique annule alors celui de l'aimant permanent. Les ventouses électromagnétiques employées sur Chevalier Noir exercent une traction de 21 kg, voir détails en annexe. Des ventouses de cette famille ont été qualifiées en vol sur trois minifusées ainsi que sur la fusée expérimentale Laïka du club STS (système d'ouverture de la porte parachute). Aucun échec n'a été enregistré. Sur Chevalier Noir, elles sont employées pour le largage du parachute de secours, et pour libérer la minifusée. <http://radiospares-fr.rs-online.com/web/search/searchBrowseAction.html?method=getProduct&R=0346132>.

**BEC** : Battery Eliminator Circuit : dispositif permettant d'alimenter les récepteurs (et donc aussi les servos) à partir des batteries alimentant les moteurs, d'où son nom : il permet de se passer d'une batterie dédiée au récepteur. Sur Chevalier Noir, ils permettent de convertir le 22V du bus principal en 5 ou 6V pour les récepteurs et les servos. Ce moyen d'alimentation est systématiquement redondé sur Chevalier Noir par un basculeur et une batterie de secours.

**Récepteurs PPM et PCM** : il existe en modélisme deux grands formats de transmission des commandes de la radiocommande au récepteur. Le PPM (Pulse Position Modulation) correspond à l'envoi d'une trame de 20 ms environ comportant une série de 8 créneaux PWM, chacun correspondant à la commande d'un servomoteur (une voie du récepteur). Le récepteur démodule alors ce signal pour fournir à chaque voie (chaque servo) son signal de commande PWM. Le PCM (Pulse Code Modulation) correspond à une transmission des consignes sous forme binaire codée (typiquement 1024 valeurs possibles pour chaque servo) que le récepteur convertit alors en commandes PWM pour les servos. Ce dernier format est beaucoup plus résistant aux interférences, et permet de plus de transmettre d'autres informations, et en particulier la position "par défaut" que doivent adopter les servos en cas de perte de la liaison. Ce dernier format est employé sur Chevalier Noir du fait de la sécurité qu'il procure, en particulier afin de se prémunir de transitoires sur les interrupteurs électro-mécaniques.

**Moteurs brushless** : moteurs sans contact, dans lesquels la partie tournante est entraînée par des champs magnétiques, sans frottement. Les moteurs de Chevalier Noir sont des moteurs brushless de modélisme, dits "outrunners" : à cage tournante, permettant un couple élevé sans boîte de vitesse et un rendement optimal.

Variateurs : cartes électroniques de modélisme commandant les champs magnétiques tournants des moteurs brushless, en obéissant à une commande transmise en PWM. Ils sont alimentés par le bus principal.

**Bus principal** : bus électrique à 22V alimenté par des batteries LiPo à 6 éléments (6S), branchées en parallèle. Il fournit l'alimentation des moteurs, et l'alimentation nominale de tous les équipements (via des BECs).

### Espionnage :

Sur Chevalier Noir, deux types d'espionnage sont pratiqués :

- La mesure directe de tensions, pour surveiller le voltage du bus principal et des batteries redondantes de secours.

- L'espionnage de signaux. L'état des signaux PWM en sortie des récepteurs vol et sauvegarde est espionné par Micav. L'espionnage consiste en la mesure de la largeur des créneaux PWM sur une voie de chacun de ces récepteurs : pour le récepteur vol, il s'agit de la voie associée à l'autorisation d'allumage, pour le récepteur sauvegarde de la voie « allumage + largage ». On s'assure ainsi

pendant tout le vol de l'état des interrupteurs électro-mécaniques associés, et de l'absence de fluctuations qui pourraient trahir des problèmes de liaison (perte émetteur, récepteur, ou interférences). De cette manière, on s'assure pendant tout le vol du bon fonctionnement des sources d'alimentation, et des liaisons radio, même lorsqu'elles ne sont pas sollicitées (équipements sauvegarde par exemple), ce qui permet de garantir leur disponibilité au moment critique ...

**Parachutes :** Le porteur (Chevalier Noir) et la minifusée possèdent chacun un parachute de récupération. Le système d'éjection (porte + ressort + ventouse électromagnétique) a déjà été employé avec succès à 4 reprises par le club STS (3 minifusées + fusée expérimentale Laïka). Il n'a pas à ce jour connu d'échec. Le parachute retenu pour Chevalier Noir est un modèle du commerce ([http://www.rebelrocketry.com/shop/product\\_info.php?info=p1401\\_TAC-1-Parachute-84-.html](http://www.rebelrocketry.com/shop/product_info.php?info=p1401_TAC-1-Parachute-84-.html)), muni d'un extracteur (drogue chute : [http://www.rebelrocketry.com/shop/product\\_info.php?info=p685\\_TAC-1-Drogue.html](http://www.rebelrocketry.com/shop/product_info.php?info=p685_TAC-1-Drogue.html)). Il est dimensionné pour pouvoir au besoin ramener au sol le porteur et la minifusée à une vitesse raisonnable. Toutefois, la procédure prévue en cas de problème est de larguer la minifusée sans allumage, afin qu'elle retombe sous son propre parachute, pour des raisons qui seront exposées plus bas. Dans ce cas, le porteur peut soit tenter de se poser, soit descendre sous son propre parachute. Le largage et l'ouverture du parachute de la minifusée sera testé à plusieurs reprises en vol avant la campagne (sur une minifusée inerte, sans propulseur !). Les parachutes sont décrits en annexe.

## *Introduction*

Ce document a pour but de définir les procédures à suivre afin de permettre une sécurité optimale au cours d'un largage aéroporté sous avion d'une minifusée. Nous décrirons dans un premier temps le système et tous les éléments qui le constituent (avion, rampe, fusée, systèmes de pilotage). Nous décrirons dans un second temps le terrain des opérations et la séquence de vol. Nous présenterons ensuite les procédures de mise en œuvre de l'ensemble, dans le cadre d'une analyse de sauvegarde. Enfin, nous proposerons une démarche de qualification de ce système spécifique avant et pendant la campagne.

La sécurité d'un lancement de minifusée depuis une rampe au sol est parfaitement définie. Il s'agit ici de démontrer que le système, tel qu'il a été conçu, revient à créer des conditions où l'avion est assimilable à une rampe de lancement à quelques dizaines de mètres du sol. En particulier, l'orientation (cap, inclinaison, attitude) et l'altitude de la rampe aéroportée lors du lancement doivent être garanties

Une description exacte nécessite l'utilisation de termes techniques et d'abréviations. De plus certains termes courants auront une signification précise dans ce document. Pour clarifier l'utilisation du vocabulaire, un lexique situé en début de document reprend les principaux termes employés.

## *Description du système*

### Description sommaire du porteur

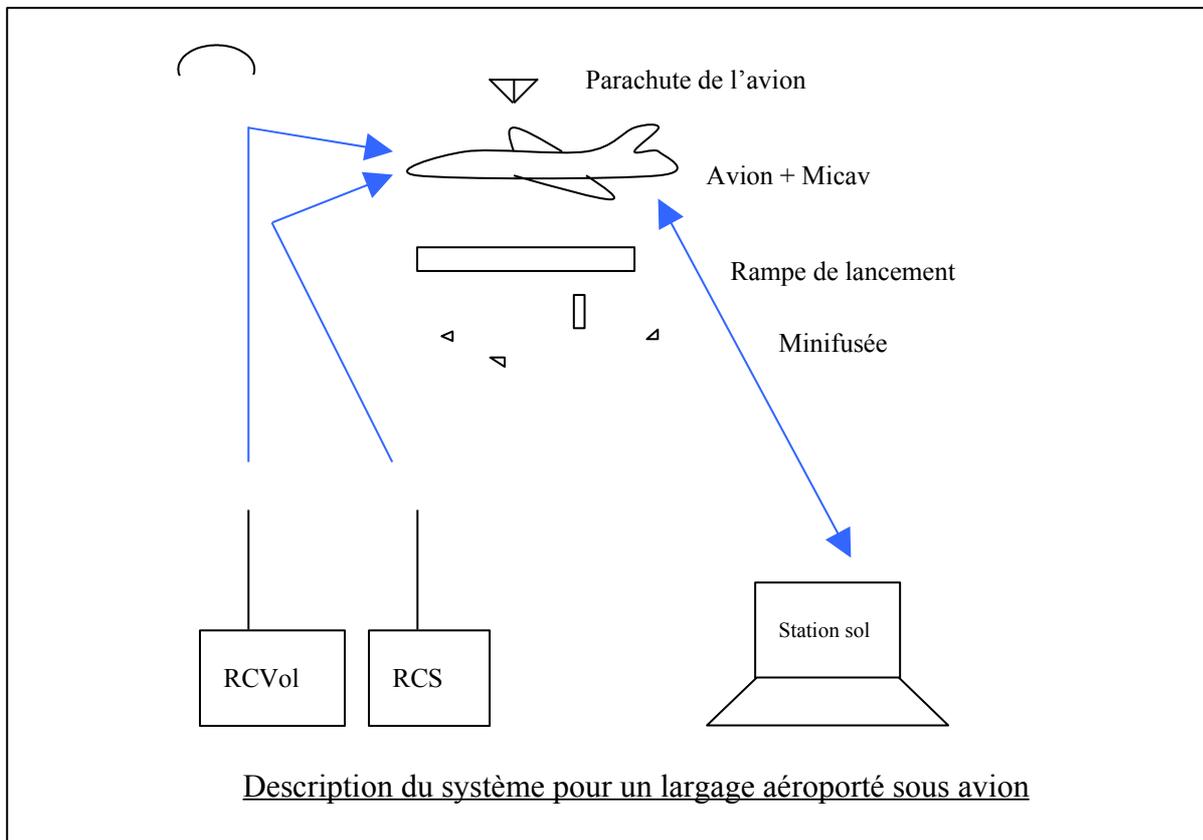
La photo en couverture et celle ci-dessous (avec la fusée Laïka au premier plan, et Xcalibur accrochée sous Chevalier Noir) donnent l'allure du porteur (Chevalier Noir), qui comporte trois coques susceptibles de recevoir des expériences, et une aile en forme de « W ». L'empennage repose sur deux poutres en carbone, fixées aux coques latérales. L'emport de la rampe aéroportée et de la minifusée Xcalibur se fait sous la coque centrale.



Envergure	2,9 m
Longueur (hors fusée)	1,5 m
Poids sans fusée, en ordre de vol	7 kg
Poids maximal avec fusée et rampe	10 kg ( soit 3 kg de charge utile)
Vitesse de croisière	70 km/h
Vitesse de pointe	100 km/h

Angle au sommet du « W »	30 degrés
Dièdre	+3 degrés
Corde à l'implanture	35 cm
Motorisation	2 moteurs électriques de 1100 W (puissance maximale, soit une poussée de 4,6 kg/moteur)
Puissance consommée en croisière	500 W (1,5 kg de poussée par moteur)
Batteries	2 à 6 batteries Lithium-Polymère 6S
Matériaux employés	Aluminium, balsa, polystyrène, carbone, contreplaqué, dépron
Autonomie	10 à 30 minutes selon charge et batteries
Altitude maximale accessible	500 m à 2000 m selon charge et batteries

## Description du système de commande



**RCVol** : Radiocommande numéro 1 dite radiocommande de vol sert exclusivement au vol en manuel de l'avion, et est utilisé par le pilote de l'avion. Par le biais de cette radiocommande le pilote donnera également une autorisation de tir de la fusée pour permettre l'allumage de celle-ci en temps voulu. Ainsi même pendant la phase de vol assisté le pilote, garde un contrôle sur la séquence de tir de la fusée s'il juge que l'avion est sur une trajectoire correcte.

**RCS** : Radiocommande numéro 2 dite radiocommande de sauvegarde, elle sert exclusivement à la libération et à l'allumage de la fusée en cas de vol nominal et à l'ouverture du parachute de l'avion ainsi qu'à l'évacuation de la fusée hors de sa rampe en cas de configuration dégradée, elle est contrôlée par un membre du club STS responsable de la sauvegarde, ou par un responsable désigné par l'autorité de sauvegarde.

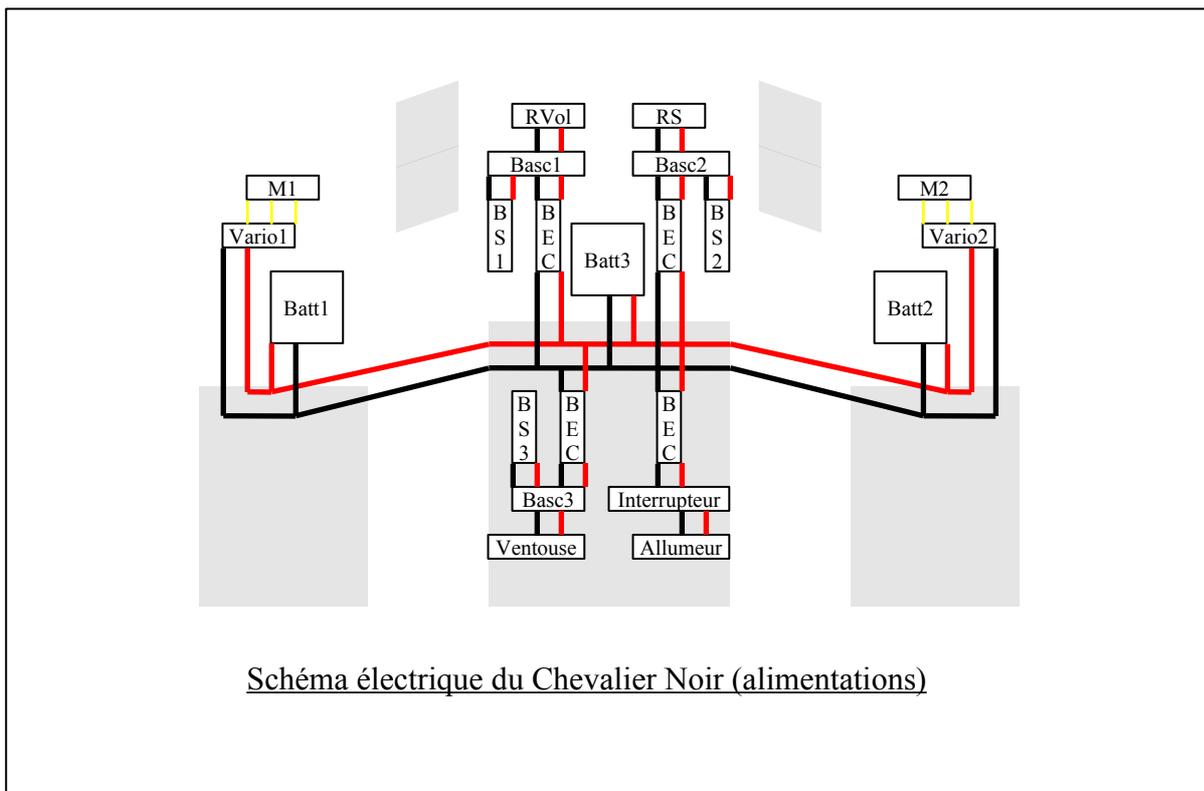
**Station sol** : Ordinateur de surveillance qui prend le relais de RCVOL et RCS dans la phase de vol assisté, sous le contrôle du responsable du vol assisté (opérateur station sol). A tout moment RCVOL peut reprendre la main sur le drone sans autre intervention que celle de l'utilisateur de RCVOL (le pilote du drone)

## Liaisons radio.

Trois liaisons radio sont utilisées, une liaison numérique bidirectionnelle (Station sol – Micav)

fonctionnant à 2.4 GHz ou 868MHz, et deux liaisons unidirectionnelles sol -> avion, dites « vol » et « sauvegarde » à base de radiocommandes et de récepteurs de modélisme travaillant à des fréquences différentes. Les deux radiocommandes fonctionnent en mode PCM (voir lexique), afin d'offrir plus de robustesse aux interférences, et de garantir l'état des servomoteurs commandés (en particulier les interrupteurs électromécaniques) en cas de perte de liaison radio. La radiocommande de vol opère dans la bande des 41 MHz, et la radiocommande de sauvegarde dans la bande des 72 MHz (bandes autorisées pour l'aéromodélisme).

## Description de l'avionique et système électrique du Chevalier Noir



Le schéma électrique ci-dessus met en évidence une redondance systématique qui permet un vol sécurisé. La conception s'écarte de l'aéromodélisme classique pour prendre en compte les contraintes d'un système lanceur de fusée. La redondance systématique de l'alimentation permet de garantir l'alimentation des récepteurs embarqués (vol et sauvegarde) et des dispositifs critiques (ventouses électromagnétiques, relais, allumeur) impliqués dans le largage et l'allumage de la minifusée, ou la sauvegarde du porteur (arrêt moteurs et ouverture parachute de secours), en cas de défaillance de l'alimentation principale (bus principal). Une seule ventouse électromagnétique est représentée sur le schéma, mais une 2e est présente, branchée de manière identique sur la coque centrale (une pour libérer la minifusée, et une pour le parachute du porteur).

### Alimentation électrique par le circuit principal :

Un bus électrique principal relie les trois coques (1 fil rouge + 1 fil noir = masse). En l'état actuel, il

permet de brancher directement jusqu'à 2 batteries par coque, en parallèle (une batterie par coque représentées sur le schéma). Ce système permet de garantir une alimentation identique des deux moteurs (via les variateurs), et de brancher un nombre de batteries adapté à la mission (autonomie, décharge max de chaque batterie). L'alimentation nominale des récepteurs est également assurée par un BEC externe branché sur ce bus. Tous les éléments critiques (récepteurs, ventouses, relais, allumeur) sont alimentés en nominal sur ce bus. Toute défaillance de ce bus peut être immédiatement perçue, car elle se traduit par une perte de puissance des moteurs.

### **Alimentation du récepteur et des servomoteurs de vol :**

Le récepteur et les servomoteurs sont alimentés via un basculeur, qui permet la commutation automatique entre deux sources d'alimentation :

- Le bus principal, via un Bec externe
- La batterie de secours récepteur, qui garantit l'alimentation continue du récepteur et des servomoteurs en cas de défaillance du bus électrique principal.

### **Alimentation de sauvegarde (parachute porteur de l'avion et largage fusée)**

Le récepteur de sauvegarde est alimenté par un système similaire au récepteur de vol : un basculeur relié au bus principal (BEC) et une batterie de secours « sauvegarde ». Il permet de commander trois actions, par trois interrupteurs distincts :

- Allumage et largage de la fusée
- Largage fusée sans allumage
- ouverture du parachute et coupure de l'alimentation des moteurs

Le largage fusée et l'ouverture parachute du porteur sont réalisés par des ventouses magnétiques (distinctes).

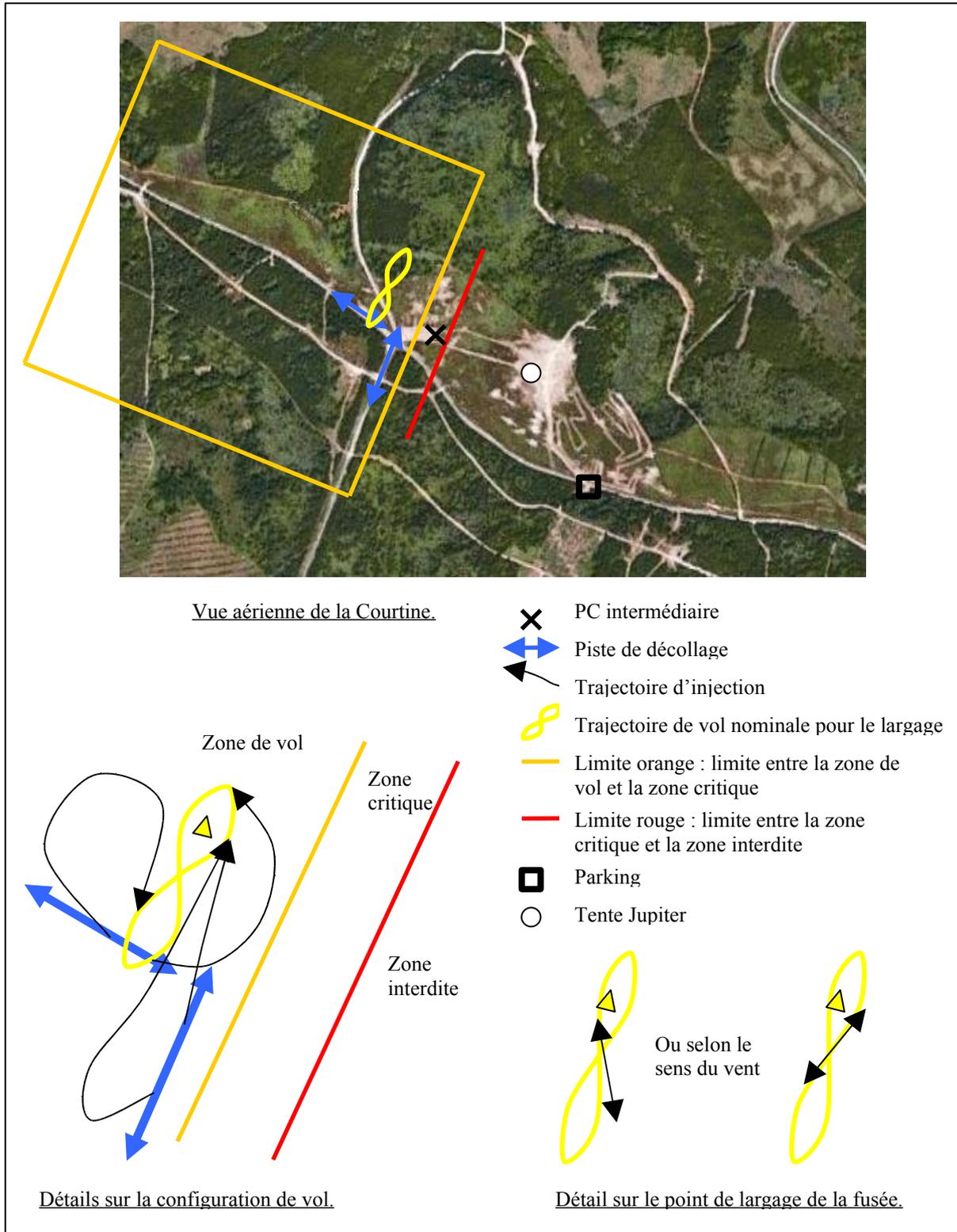
Les tensions sur le bus électrique principal et les batteries de secours (vol, sauvegarde et équipements) sont mesurées et transmises à la station sol par la télémétrie Micav pendant toute la mission. On peut ainsi garantir la disponibilité des alimentations de secours, et surveiller la décharge des batteries du bus principal.

### **Alimentation Micav.**

Le système de télémétrie/ aide au pilotage Micav est alimenté par sa propre batterie (7.4V 2S LiPo, typiquement). Lorsqu'il est utilisé, les servomoteurs restent alimentés par le système précédent.

## *Description du terrain*

Pour des raisons qui seront expliquées dans la suite, nous définissons deux limites de sécurité sur le terrain de la courtine au cours d'un largage aéroporté selon le schéma :



La zone de vol est la zone dans laquelle l'avion et sa fusée peuvent évoluer avec pour seule contrainte de ne jamais pointer la fusée vers le public. En particulier, les virages sur la trajectoire « en 8 » se font dos au public. Cette région est un cube de 1 km de côté. Deux routes à angle droit situées près de la rampe fusex sont susceptibles de servir au décollage et à l'atterrissage, selon l'orientation du vent.

## *Description d'une séquence de largage aéroporté sous avion.*

Le largage sous avion nécessite une préparation particulière en plus de la préparation d'un lancement de fusée.

Le jour J : jour du lancement, une fois sur site avec le matériel il s'agit de réaliser le montage de l'ensemble avion+fusée. Une procédure est définie afin d'éviter tout risque d'échec de lancement. On trouvera en Annexe 1 : checkliست pré-vol ce qu'il est nécessaire de faire pour la préparation de l'avion et en Annexe 2 : Mise en place de la minifusée et de la charge pyrotechnique sur l'avion porteur.

Nous supposons maintenant le porteur prêt au décollage. Le vol en vue du largage aéroporté doit suivre la procédure suivante :

- L'avion est manuellement placé au point de début de roulage au sol
- La fusée est placée sur la rampe sous l'avion
- Le propulseur de la minifusée est placé sur la fusée. (voir détail en annexe)
- Allumage émetteurs vol et sauvegarde (voir détail en annexe)
- Test au sol de la RCVOL pour les commandes de l'avion (voir détail en annexe)
- Test au sol sur RCS (voir détail en annexe)
- Enlèvement barrière mécanique (voir détail en annexe)
- Eloignement du personnel (pyrotechnicien et pilote)
- Décollage : trajectoire d'injection sur la trajectoire de vol nominale en forme de « 8 »
- Mise sur la trajectoire de test-prélargage
- Test : le pilote injecte le lanceur sur une trajectoire en forme de « 8 » afin de tester les commandes. Un seul passage sur cette courbe est suffisant pour vérifier la réponse des commandes. L'espionnage des sorties RCVol et RCS réalisé par Micav permet une vérification continue de l'aptitude de l'avion à réaliser la ressource en vue du lancement de la fusée ou d'une manœuvre de sauvegarde
- On enclenche l'assistance au vol par la station sol : le pilote bascule un interrupteur sur sa radiocommande afin passer en mode assisté (désormais supervisé par l'opérateur station sol)
- vérification des paramètres avant ressource : le calcul embarqué fait réaliser au lanceur un second « 8 » sur la trajectoire de test pour vérifier les paramètres vol et permet au personnel au sol de s'assurer du contrôle du porteur par ce système
- ressource
- allumage minifusée
- manœuvre de maintien de contrôle de l'avion
- manœuvre d'insertion sur la trajectoire post largage (identique au « 8 » de test-prélargage)
- Reprise en manuel du contrôle de l'avion : déconnexion de l'assistance au vol par simple intervention du pilote sur sa radiocommande (RCVOL)
- Atterrissage
- Une équipe est dédiée à la récupération du drone et une autre pour la récupération de la minifusée. Aucune équipe n'intervient tant qu'à la fois l'avion et la fusée n'ont pas atteint le sol.

## *Emplacement des postes de contrôle.*

RCVOL : voisinage PC intermédiaire

RCS : voisinage PC intermédiaire

Station sol : Tente Jupiter

Ces trois personnes sont liées par un casque de communication radiofréquence de faible puissance (<1W) permettant de garder les 2 mains libres pour le contrôle des radiocommandes et du PC station sol.

Le responsable de la station sol n'ayant pas pour fonction de piloter l'avion en mode radiocommandé sera en binôme avec un second pilote en cas de défaillance de RCVOL. En effet, Micav permet un contrôle manuel direct de l'avion à l'aide d'une « radiocommande USB » branchée sur le PC station sol et peut bénéficier de la fréquence de Micav pour réaliser une redondance des commandes manuelles en cas de défaillance de RCVOL.

La radiocommande de sauvegarde sera confiée à un membre de STS ou à un responsable sauvegarde désigné par l'autorité de sauvegarde (sur demande de cette dernière). Cette personne sera idéalement accompagnée d'un assistant muni de jumelles. Le duo sera placé de manière à pouvoir visualiser de manière optimale la phase de ressource-largage, en particulier le cap et l'inclinaison.

## *Description des mesures de sécurité supplémentaires prises par rapport au lancement depuis une rampe au sol*

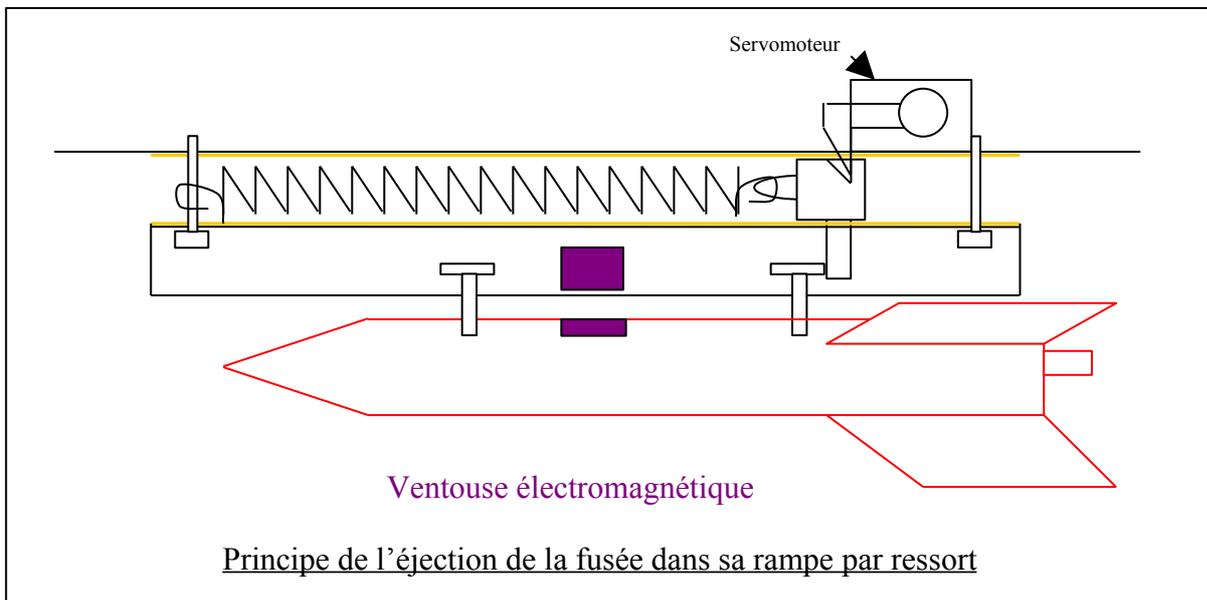
- 1) La trajectoire de test-prélargage est définie afin qu'à aucun moment l'ensemble avion + minifusée ne vise le public.
- 2) Les distances entre le public et l'ensemble avion + minifusée sont celles définies pour à une mise à feu de fusex depuis le sol
- 3) La vitesse en sortie de rampe est essentiellement donnée par l'avion (rampe plus courte qu'une rampe sol)
- 4) Le présent document fait une analyse des pannes mais également une analyse des doubles pannes

Ce qui précède décrit l'ensemble des opérations réalisées dans le cas d'un vol nominal. Nous allons maintenant entrer plus en détail dans la description de l'avion et de son électronique embarquée, en particulier la logique de commande, afin de réaliser une analyse de sécurité complète. Nous présenterons en outre une analyse de la minifusée.

## *Description de la rampe de lancement aéroportée :*

Il s'agit d'une rampe simple « à glissière », fixée sous la coque centrale du porteur. On peut la concevoir comme une tringle à rideaux, d'environ 1.50 m de long. Trois glissières sur la minifusée, une à l'avant, deux à l'arrière lui permettent de coulisser sur cette rampe, et assurent le maintien en roulis de la fusée jusqu'à ce que les ailerons soient passés entre les hélices. La fusée est bloquée en translation jusqu'à son allumage par une ventouse électromagnétique d'une force de 21 kg.

Un ressort permet d'éjecter la fusée par l'avant en cas de largage sans allumage propulseur. L'éjection de la minifusée ne peut se faire que par l'avant.

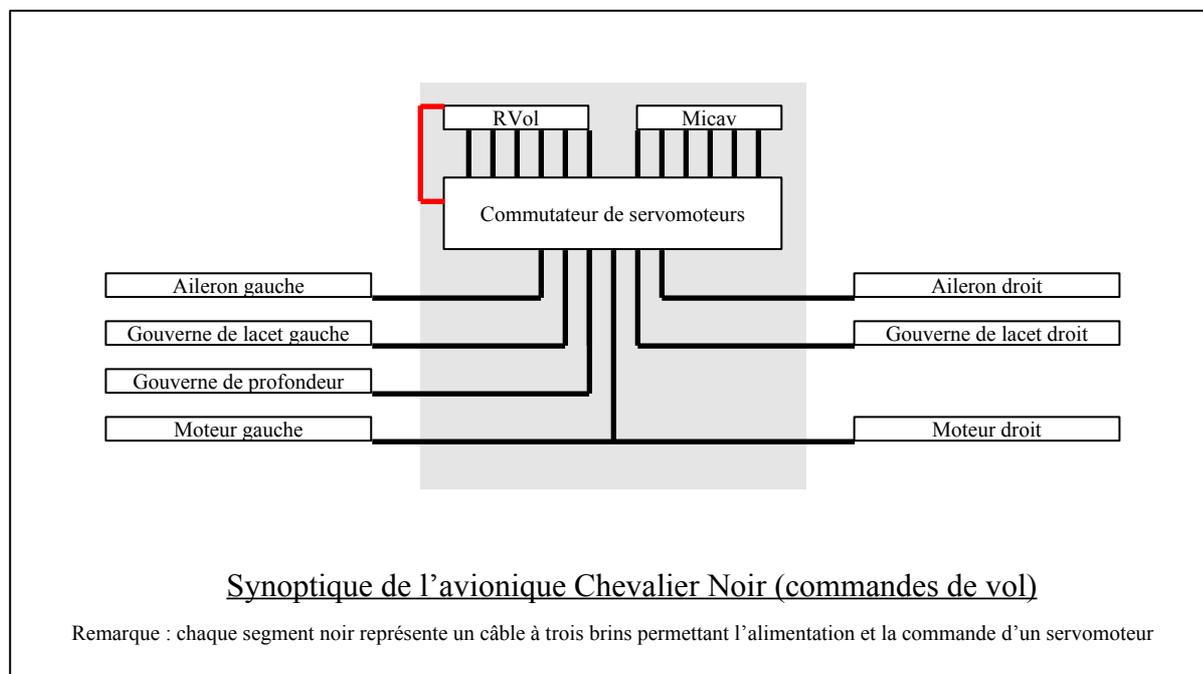


## *Etude sauvegarde*

Le système doit être Failsafe-Failsafe (FS-FS) vis-à-vis de tout accident pouvant entraîner des blessures sur des personnes, et au moins Failsafe (FS) vis-à-vis de tout autre incident (par exemple crash du porteur). FS signifie que l'on doit être encore en sécurité suite à une défaillance quelconque, FS-FS suite à deux. Après avoir décrit les moyens matériels de la sauvegarde, on définit ci-dessous les événements redoutés, et les séquences pouvant y conduire afin de vérifier cette spécification.

### **Description du système avion, aspects commande.**

On s'intéresse ici à la logique de commande, les alimentations redondées ne sont pas représentées, ainsi que le détail des alimentations (BECs, commutateurs).



Comme mentionné plus haut, le Chevalier Noir offre deux modes de vol :

- Le premier est contrôlé via un PC (modem numérique), dit « station sol » et permet un pilotage manuel ou assisté grâce à la carte embarquée Micav. La carte embarquée Micav (pour « Micro avionique ») comprend notamment des capteurs (centrale inertielle, altimètre ...), un processeur embarqué et un modem numérique fonctionnant à 2.4 GHz ou 868 MHz. Une capture d'écran de la station sol est donnée en annexe.
- Le second est un vol radiocommandé standard, utilisant une radiocommande dite radiocommande de vol et un récepteur d'aéromodélisme dans la bande des 41 MHz.

La commutation entre les deux modes de vol est assurée par une carte dédiée du commerce (voir lexique et annexe). Elle est commandée par la radiocommande de vol sur une voie dédiée

(basculement d'un interrupteur). Un seul des deux systèmes a accès aux servomoteurs à un instant donné.

Le mode radiocommandé garantit la conservation du contrôle de l'avion en cas de défaillance du premier système.

Une seconde radiocommande, dite de sauvegarde, permet de déclencher le parachute et de couper les moteurs, ce qui permet de garantir le respect du domaine de vol en cas de défaillance des autres systèmes de contrôle (Micav et RCVol). Ce système permet la récupération de l'avion et éventuellement de la fusée en cas de défaillance majeure telle que rupture mécanique, départ en vrille ou perte des deux systèmes de commande Micav et radiocommande vol. Elle sert également à libérer la fusée (allumage + largage), voir séquence de largage fusée. Enfin, elle permet de libérer la fusée sans allumage en cas de défaillance du porteur. La fusée retombe alors sous son parachute (approche privilégiée, voir plus loin).

### Commandes impliquées dans la sauvegarde.

Les commandes sont notées sous la forme suivante : Acronyme émetteur -> acronyme récepteur : nom commande.

MICAV->PC : ALLUM-RDY : informe le sol que les paramètres bord sont OK pour l'allumage minifusée.

PC->MICAV :OK-ALLUM : valide l'autorisation d'allumage suite à la réception du message précédent.

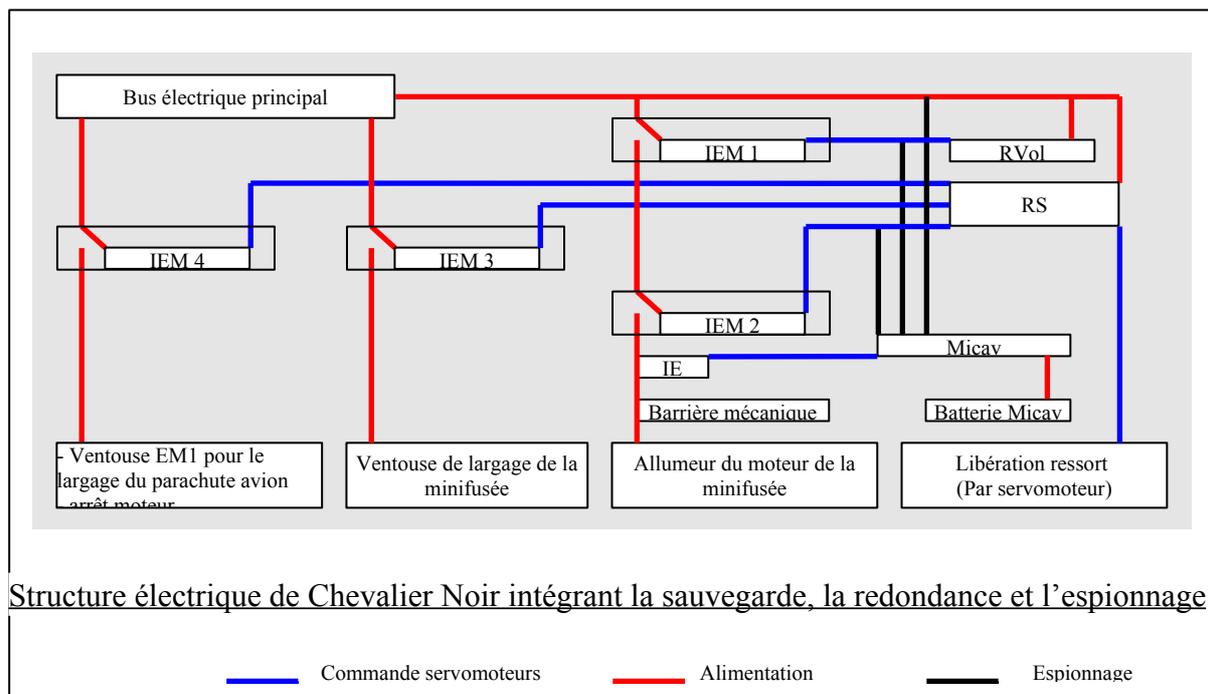
RCS->RS :OK-ALLUM-LARG : commande l'allumage et le largage de la minifusée.

RCS->RS :OK -LARG : commande le largage seul (par ressort)

RCS->RS : OK-PARA : commande l'arrêt des moteurs du porteur et l'ouverture de son parachute.

RCV->RVol :OK-ALLUM : autorise l'allumage minifusée.

Le principe des commandes largage, allumage et sauvegarde à bord de Chevalier Noir est décrit dans le schéma suivant :



L'utilisation d'interrupteurs électro-mécaniques, commandés directement par des servomoteurs branchés sur les récepteurs vol et sauvegarde, permet de réaliser avec le moins d'intermédiaires possibles (pas de microcontrôleurs, convertisseurs, etc ..) la logique de sauvegarde. La fonction logique ET est réalisée en plaçant les interrupteurs en série, la fonction OU en les plaçant en parallèle. L'état ouvert de ces interrupteurs en l'absence de commande est garanti par le fait qu'un servomoteur ne peut bouger sans alimentation (cas de panne d'alimentation) et sans commande transmise sans interférence (utilisation du PCM sur les liaisons radio). De plus, il peut facilement être inspecté visuellement, ce dont nous faisons usage dans la procédure de mise en place du propulseur sur la minifusée (voir annexe). Par contraste, d'un point de vue sauvegarde, il est quasi impossible de connaître avec certitude l'état de IE, le code embarqué sur Micav n'étant pas qualifié comme par exemple, des logiciels critiques Ariane 5 (il serait extrêmement difficile de prouver qu'aucun bug logiciel ne peut actionner le pin commandant cet interrupteur ...). Mais le seul interrupteur électrique IE ne suffit pas à autoriser l'allumage, il doit donc être vu comme une validation supplémentaire permettant d'intégrer la télémétrie vol dans le processus d'autorisation.

### **Vol de l'avion :**

Le déroulement normal d'un vol consiste en un décollage en mode radiocommandé, une commutation vers le mode Micav pour réaliser la mission jusqu'au retour de l'avion près de son point d'atterrissage, un retour en mode radiocommandé pour l'atterrissage. Les commutations se font sur une trajectoire en ligne droite, à altitude constante. Le domaine de vol autorisé de l'avion est défini par deux lignes délimitant deux zones de vol. Les règles suivantes sont appliquées afin de garantir que l'avion ne peut impacter le public : si l'avion franchit la zone critique, l'ordinateur de bord (Micav) doit immédiatement tenter de le ramener dos au public. En cas d'échec, la manœuvre s'effectue manuellement (par le pilote via RCVol). En cas d'approche de la zone interdite, la radiocommande de sauvegarde est employée pour larguer (sans allumage) la minifusée (s'il y a lieu), qui retombe sous son parachute, puis commander l'arrêt des moteurs et l'ouverture du parachute de porteur, ce qui assure son atterrissage rapide et hors de portée du public.

### **Séquence de largage fusée.**

Le système d'allumage fusée est protégé au sol par quatre barrières, une mécanique, une électrique, et deux électromécaniques (la rotation d'un servomoteur permet de fermer le circuit). La barrière mécanique sert à garantir le non allumage au sol. Il s'agit d'un composant pyrotechnique du commerce, qui peut être imposé par l'autorité de sauvegarde (à défaut, elle sera choisie par STS autant que possible identique à celles qui équipent les rampes minifusées au sol). Elle est retirée juste avant le décollage (voir procédure détaillée en annexe).

Le largage nominal de la fusée s'effectue en mode Micav assisté, face au vent, qui doit souffler de manière à ce que l'avion tourne autant que possible le dos au public. Trois interrupteurs électriques empêchent à ce stade la mise en route du système d'allumage fusée. Le porteur prend un cap de largage prédéfini dans le plan de vol, et amorce une ressource. Le pilote peut alors débloquent son interrupteur (interrupteur sur RCVol, commande RCV->RVol :OK-ALLUM adressée à IEM1), tant que la manœuvre lui paraît correcte. Lorsque la position, le cap et l'attitude sont jugés corrects par le programme de vol pour procéder au largage, un voyant spécifique passe au vert sur l'écran de la station sol (envoi de MICAV -> PC : ALLUM-RDY). L'opérateur station sol doit alors valider par l'envoi d'une commande spécifique (PC -> MICAV : OK-ALLUM) pour débloquent l'interrupteur électrique (IE). Si les conditions bord cessent d'être dans le domaine autorisé, IE se rouvre, le voyant repasse au rouge et cette procédure est à recommencer. Enfin, la dernière barrière est levée par la radiocommande sauvegarde (commande RCS -> RS : OK-LARG-ALLUM, actionne IEM2 et IEM3 : mixage programmé dans la radiocommande). En l'actionnant on libère la fusée (ventouse

magnétique de fixation IEM3) et on autorise l'allumage (IEM2) sous réserve que les deux autres interrupteurs IEM1 et IE, et la barrière mécanique aient été débloqués.

De cette manière, une fois l'avion en vol, la mise à feu doit être autorisée quatre fois pour pouvoir avoir lieu : par le programme de vol, sur la base de critères vol (attitude, cap, position GPS), par l'opérateur station sol qui doit valider, par les radiocommandes vol (pilote) et sauvegarde. Toutes ces personnes peuvent surveiller l'avion sous des angles différents et complémentaires, directement (pilote et opérateur sauvegarde, tente Jupiter), à la jumelle (assistant opérateur sauvegarde), ou par la télémétrie embarquée (opérateur station sol), et assurer un allumage seulement dans les conditions autorisées. De plus, les trois chaînes de commande Micav, vol et sauvegarde sont strictement indépendantes (opérateurs, émetteurs, récepteurs, actionneurs, fréquences, batteries redondantes distincts ...), ce qui exclut autant que faire se peut la possibilité de modes de défaillances communes.

Le largage sans allumage de la fusée peut par contre être commandé par la seule télécommande sauvegarde (commande RCS -> RS adressée à IEM3 et à un servo ordinaire qui débloquent le ressort, commande figurée en pointillés sur le schéma), ce qui permet d'assurer la possibilité de larguer la fusée sans toucher à l'allumage en cas de défaillance du porteur en vol. Le largage sans allumage de la fusée n'est pas dangereux pour le public, et est préféré au risque d'allumage intempestif en cas de problèmes avec le contrôle du porteur, nous y reviendrons. On remarquera que l'alimentation de la ventouse électromagnétique est découplée du circuit d'allumage : aucun risque d'agir sur l'allumeur en exécutant cette commande !

Si le porteur ne peut être piloté manuellement jusqu'à l'atterrissage, ses moteurs sont coupés, et son parachute est ouvert, par l'envoi de la commande RCS->RS :OK-PARA, qui actionne IEM4.

La radiocommande de sauvegarde commande donc 4 voies (IEM2, IEM3, IEM4, et servo de déblocage ressort), commandées par 3 interrupteurs, en faisant usage de la capacité de mixage numérique de la radiocommande pour les actions décrites ci-dessus.

Le largage de la fusée est par contre commandé par la seule télécommande sauvegarde, ce qui permet d'assurer à la fois le largage nominal, et la possibilité de larguer la fusée sans allumage en cas de défaillance du porteur en vol

## **Philosophie générale**

L'approche générale vis-à-vis des « petites pannes » pour la mission de largage aéroporté est la suivante : en cas de défaillance ou d'anomalie, même transitoire d'un sous-système n'empêchant pas le contrôle de l'avion, l'avion est piloté jusqu'à un point de largage minifusée prédéfini (éloigné du public et permettant une récupération facile de la minifusée), la minifusée est larguée sans allumage, et le porteur est posé manuellement. La minifusée retombe alors sous son parachute. Le problème est ensuite analysé au sol jusqu'à ce qu'une explication et une parade satisfaisantes soient trouvées. En cas de panne plus grave affectant le contrôle ou le vol de l'avion, la minifusée est larguée immédiatement sans allumage et la radiocommande de sauvegarde est utilisée pour commander l'arrêt des moteurs et l'ouverture du parachute de secours de l'avion. En cas d'abandon de la manœuvre de ressource / allumage largage minifusée avant l'armement du propulseur, pour cause de facteur externe type rafale de vent, la manœuvre peut être retentée. Après armement de la minifusée, si l'allumage ne se produit pas quelle que soit la raison, l'avion est tourné manuellement

dos au public et la minifusée larguée sans allumage, avant atterrissage manuel du porteur.

En résumé : il y a deux types de modes dégradés.

- 1) Soit il y a urgence au largage de la fusée sans allumage de son moteur : dans ce cas la trajectoire aura été prévue pour que l'impact au sol soit situé dans une zone facilitant au maximum la procédure de récupération d'une minifusée équipée d'un moteur potentiellement actif,
- 2) Soit il n'y a pas urgence, dans ce cas, en vol manuel, il y aura largage au dessus d'un point prédéfini ou la récupération de la minifusée sera cette fois réalisable dans des conditions optimales.

On s'interdit pour l'instant dans la procédure de poser l'avion avec la minifusée active attachée dessous, bien que la manoeuvre soit possible (et testée à de nombreuses reprises avec des minifusées inertes pour valider en vol le comportement de l'avion avec fusée). La principale raison de ce choix est que l'on souhaite par dessus tout éviter un risque de crash du porteur avec la minifusée, ce qui placerait l'ensemble porteur + allumeur + minifusée dans un état inconnu et potentiellement dangereux. En les séparant, on s'assure, même dans le pire cas (crash du porteur ET de la minifusée, par exemple sur défaillance parachute(s)) que l'allumeur et le propulseur sont séparés, ce qui est jugé préférable.

Cette position pourrait être revue dans le cas de pannes mineures n'affectant pas la sauvegarde et le contrôle de l'avion sur demande de l'autorité de sauvegarde. Par exemple, il pourrait être estimé que dans le cas d'une panne de Micav, l'avion peut être posé manuellement sans difficulté (liaisons vol et sauvegarde opérationnelles), et que l'on préfère atterrir ainsi plutôt que de prendre le risque d'une non ouverture du parachute de la minifusée après largage. Ce n'est toutefois pas notre position actuelle : nous comptons procéder à plusieurs tests de largage sans allumage de la minifusée (inerte !) afin d'acquiescer une confiance absolue dans ce dispositif (éjection de la minifusée + ouverture de son parachute).

Le système doit être Failsafe-Failsafe (FS-FS) vis-à-vis de tout accident pouvant entraîner des blessures sur des personnes, et au moins Failsafe (FS) vis-à-vis de tout autre incident (par exemple crash du porteur). FS signifie que l'on doit être encore en sécurité suite à une défaillance quelconque, FS-FS suite à deux. On définit ci-dessous les événements redoutés, et les séquences pouvant y conduire afin de vérifier cette spécification.

## **Evènements redoutés**

### **Evènements pouvant entraîner des blessures sur les personnes**

**Allumage inopiné de la minifusée.** Le danger dans ce cas est d'allumer et de larguer la minifusée dans une direction visant le public, dans une phase de vol normal (autre que la phase de largage), ou d'avoir un allumage au sol, par exemple lors de la mise en place de l'allumeur.

La sécurité dans le second cas est garantie par la présence de quatre barrières dont une électrique, deux électromécaniques et une mécanique. Cette dernière est retirée avant le décollage, après mise en place du propulseur minifusée et de l'allumeur (voir procédure détaillée en annexe). Elle peut éventuellement être retirée à distance, par exemple en tirant sur un fil à une dizaine de mètres de l'avion. La fusée ne s'allume pas même en cas de défaillance de deux barrières.

Dans le premier cas, la sécurité est assurée par la quadruple validation nécessaire pour procéder à

l'allumage : validation du pilote, critères bord (Micav), validation opérateur station sol, et enfin validation radiocommande sauvegarde. La défaillance simple d'une seule voie de commande (Micav ou radiocommande vol ou sauvegarde) ne peut entraîner l'allumage. Les trois circuits de validations (radiocommandes sol et vol, et Micav) ont un homme dans la boucle et sont matériellement indépendants comme souligné plus haut (émetteurs, récepteurs, alimentations secours, actionneurs et fréquences distinctes). Pour la voie de radiocommande sauvegarde, la télécommande n'a que trois interrupteurs et un opérateur dédié, on peut donc raisonnablement considérer l'erreur humaine comme improbable. Le seul mode de défaillance vraisemblable est alors la panne de liaison (panne émetteur, panne récepteur ou panne alimentation récepteur). L'expérience montre qu'en cas de panne alimentation récepteur, les servomoteurs branchés sur le récepteur sont aussi privés d'alimentation, et donc ne bougent pas, ce qui exclut une fermeture accidentelle de l'interrupteur électromécanique. En cas de perte du récepteur, ou de la radiocommande, ou de la liaison, ou d'interférences radio, de petites oscillations des servomoteurs sont possibles, mais elles sont normalement trop faibles pour permettre le passage d'une position du servomoteur à l'état opposé. En fait, en mode PCM (voir lexique), elles sont inexistantes, ce qui sera montré en qualification campagne (voir plus loin). De surcroît, l'alimentation de ce système et la sortie vers les servomoteurs sauvegarde sont espionnées par Micav et transmises à la station sol. Toute anomalie est immédiatement signalée, en particulier l'envoi de commandes fluctuantes vers les servomoteurs. On s'apercevrait ainsi par exemple d'une anomalie sur la liaison sauvegarde avant d'avoir à s'en servir. Si toutefois ce système devait faillir, il reste la validation par Micav. Cette validation n'est possible que si l'avion est bien placé (critères bord), et nécessite un aller-retour par la liaison numérique Micav (envoi d'information vers le PC sol, et retour d'un ordre de confirmation spécifique vers l'avion). Elle ne peut donc se produire en cas de panne ou perte de la liaison Micav (dans un sens ou les 2), quelle qu'en soit l'origine (panne station sol ou panne Micav, interférences radio). Toute panne de Micav est également immédiatement visible par l'opérateur station sol (arrêt ou incohérence de la télémétrie).

La double panne de liaison (numérique Micav et RC sauvegarde) ne peut donc entraîner d'allumage involontaire.

Enfin, en précaution supplémentaire, l'avion ne vise jamais le public en vol normal, piloté ou assisté, tant qu'il porte la minifusée : trajectoire en « 8 » spécifique.

La triple erreur humaine (radio sauvegarde, radio vol et opérateur station sol) n'est possible que lorsque l'allumage est autorisé sur critères bord. Pour qu'il se produise alors dans une direction dangereuse pour le public, il faut que le système embarqué GPS + centrale inertielle soit également défaillant.

### **Allumage et largage en direction du public lors de la phase de largage**

Cet événement est distinct du précédent : dans ce cas l'allumage est commandé par la procédure normale, mais se fait toutefois dans la mauvaise direction. La couverture de cet événement redouté repose sur la complémentarité entre l'avionique embarquée et l'observation directe. Elle peut être subdivisée en deux problèmes possibles : erreur d'évaluation du cap de largage et problème lors de la ressource après autorisation allumage.

L'erreur de cap est couverte par la validation croisée sol-bord : elle nécessite une erreur d'estimation à la fois du système de navigation (GPS + centrale inertielle) embarqué, et des observateurs humains (tente Jupiter, station sol, radiocommande sauvegarde, pilote), soit au moins quatre erreurs. Les observateurs, notamment sauvegarde et pilote, peuvent être placés de manière judicieuse pour avoir une visibilité optimale de la direction de l'avion lors de la phase de largage.

Le cas du problème lors de la ressource, par exemple décrochage de l'avion, début de vrille ou de

looping suite à une rafale, panne ou autre est principalement couvert par le système bord : si les conditions (cap, attitude, position) cessent même brièvement d'être dans le domaine permis le circuit de validation Micav est à refaire, et le circuit d'allumage est ouvert. Le pilote, modéliste expérimenté, et l'assistant de l'opérateur sauvegarde, muni de jumelles, peuvent également déceler une anomalie, mais leurs réflexes sont sans doute un peu plus lents que ceux de Micav. Toujours est-il que les radiocommandes vol et sauvegarde permettent également d'ouvrir le circuit d'allumage (ou de ne jamais le fermer !) au moindre doute des observateurs au sol. L'idée derrière ces validations multiples et croisées est qu'il vaut mieux prendre le risque de ne pas lancer à tort sur une fausse alerte que de ne pas s'apercevoir d'un problème au moment du lancement.

### **Crash de l'avion avec ou sans fusée sur le public**

Le domaine d'évolution autorisé de l'avion est suffisamment éloigné du public pour que, compte tenu de son altitude et du vent possible, il ne puisse pas l'atteindre en vol plané, dès lors qu'il ne franchit pas la ligne délimitant la zone interdite. C'est ce que nous devons garantir. Les cas à considérer sont :

Perte de la liaison numérique ou erreur de navigation en mode assisté : commutation du contrôle en mode radiocommandé. Mission annulée : l'avion est éloigné du public jusqu'à un point prédéterminé permettant une récupération facile de la minifusée, et cette dernière est larguée sans allumage. Enfin, l'avion est posé manuellement.

Perte des deux voies de contrôle (numérique Micav et RC vol). Dans ce cas, la radiocommande de sauvegarde est employée, pour larguer la minifusée si elle est présente (elle doit alors ouvrir son parachute), puis commander l'arrêt des moteurs et l'éjection du parachute.

Défaillance de la liaison sauvegarde en sus : lorsque l'avion franchit la limite critique en mode assisté, l'ordinateur de bord doit essayer de tourner le dos au public afin d'éloigner l'avion en ligne droite. En cas de franchissement de la ligne interdite ou d'éloignement excessif par rapport à la station sol, il commande l'arrêt moteur et l'ouverture parachute.

### **Crash de la minifusée avec propulseur chargé.**

Deux cas sont à distinguer : crash de la minifusée après largage (volontaire ou non) par l'avion, ou crash de la minifusée encore accrochée sous l'avion. Dans les deux cas, le danger ne vient pas du crash lui-même : si l'avion est dans son domaine autorisé de vol, ni l'avion ni la minifusée ne peuvent atteindre le public. Le problème survient après : on a une minifusée crashée avec un propulseur chargé, que l'on ne peut évidemment pas laisser là. Comme nous l'avons vu plus haut (philosophie générale de la sauvegarde), toutes les procédures de sauvegarde visent à minimiser la probabilité d'un crash de l'avion avec la fusée accrochée dessous : en cas de problème, la minifusée doit être larguée sans allumage, ce qui permet de la séparer de l'allumeur. La cause la plus probable d'un crash avec minifusée serait donc une défaillance simultanée du porteur (mécanique, contrôle, alimentation moteurs ...) et de la liaison sauvegarde, empêchant le largage ou même une descente de l'ensemble porteur + minifusée sous le parachute porteur. Toutefois, l'espionnage (Micav) de la sortie du récepteur sauvegarde par Micav permettrait alors de se rendre compte de la défaillance de la liaison sauvegarde dès qu'elle survient. Dans ce cas, et dans ce cas seulement, on procéderait à l'atterrissage en manuel du porteur avec la minifusée attachée, sous contrôle du pilote (RCVol). Nous proposons de réduire le risque associé à cette manoeuvre en la répétant à plusieurs reprises avec une minifusée inerte, y compris lors des qualifications à La Courtine (voir plus bas. En cas de défaillance de la radiocommande de vol, l'atterrissage peut encore être tenté via la liaison Micav, en mode manuel, à l'aide de la radiocommande USB connectée au PC sol.

Dans le cas du crash de la minifusée après largage, nous proposons également une action de réduction du risque fondée sur des essais en vol : nous testerons à plusieurs reprises en vol le

largage de la minifusée (inerte) et sa récupération sous parachute.

Si toutefois le crash devait se produire, la procédure serait sans doute essentiellement d'attendre "un certain temps" et de procéder à une inspection visuelle à distance (à la jumelle) avant de s'approcher du propulseur de la minifusée crashée. Il peut être envisagé de profiter de la présence de pompiers sur le site pour arroser le propulseur avant de s'en approcher, si c'est utile, et selon avis des experts présents. En l'absence de l'allumeur, et compte tenu de la technologie de ces propulseurs, le risque d'allumage intempestif est infime. Enfin, le propulseur endommagé devrait être détruit ou scellé.

## **Evènements sans risque pour les personnes**

Quelle que soit la cause primaire (panne moteur, rupture mécanique, ou perte de contrôle ...), on arrive à deux évènements principaux :

**Crash du porteur sans fusée** : déjà vu. Nécessite plusieurs défaillances (porteur, contrôle et voie sauvegarde).

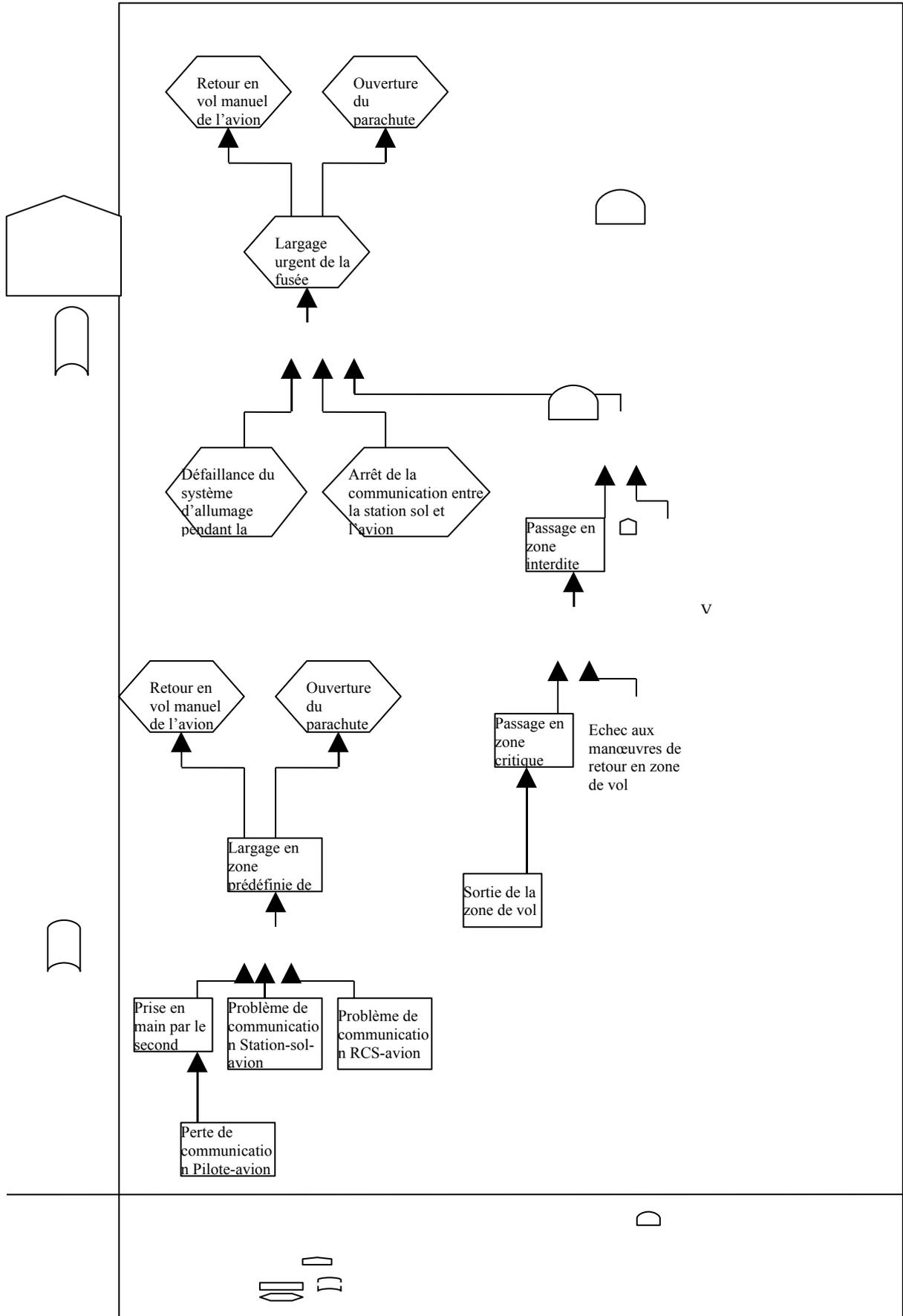
**Vol balistique de la minifusée après allumage propulseur** : (défaillance parachute minifusée) pareil que pour un lancement du sol. Peut se produire sur défaillance simple (parachute minifusée). Dès lors que la position, altitude, direction et attitude du porteur au moment de l'allumage sont dans les limites autorisées, le public est hors de portée balistique. La minifusée crashée est inoffensive. De plus, nous prévoyons une action de réduction de risque fondée sur plusieurs essais en vol de largage et descente sous parachute de la fusée inerte, qui bénéficient aussi au cas de la minifusée chargée, abondamment décrit plus haut.

## **Arbre de défaillance :**

On résume une partie de ce qui précède sur un arbre de défaillance simplifié. Pour les détails, c'est cependant le texte qui fait foi.

Pour s'assurer que tous les événements hypothétiques pouvant mener à l'accident ont été envisagés, il est utile de réaliser l'arbre de défaillance qui suit avec :

**Evènement final** : largage de la minifusée sans allumage de son moteur, en situation d'urgence ou en situation de sauvegarde



## Minifusée Xcalibur.

### Gabarit de vol.

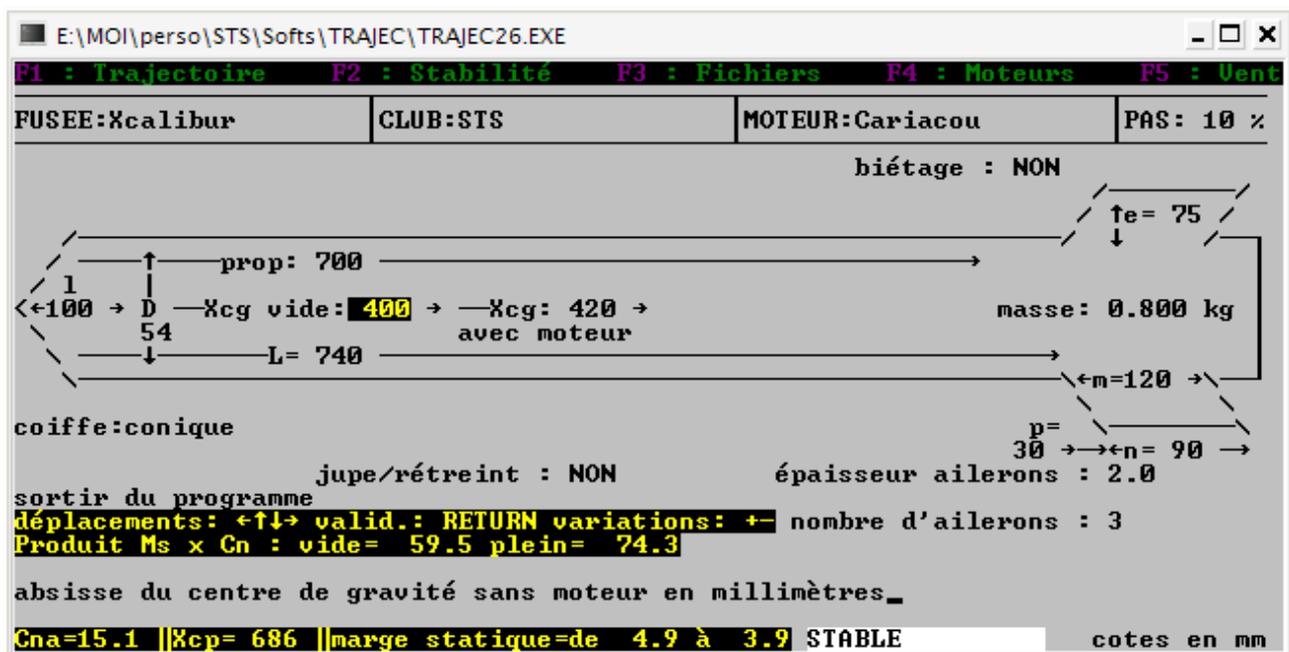
Le niveau de sécurité de l'avion précédemment décrit permet d'en faire un porteur de minifusée : il est donc équivalent à une rampe de minifusée mobile qui ne peut libérer et allumer sa charge utile qu'à condition de remplir les conditions :

- altitude comprise entre 30 m et 50 m
- vitesse porteur comprise entre 50 km/h et 70 km/h
- inclinaison comprise entre 40° et 80°
- cap compris entre xxx et xxx° (selon vent), précision de l'ordre de +/- 10 degrés
- position GPS dans le domaine de vol

### Etude de la minifusée

La minifusée n'aura rien d'atypique et s'approchera le plus possible au niveau de sa structure des précédents projets de l'association STS dont les caractères stables et sécuritaires ont déjà été prouvés. En outre, la similitude avec un projet passé nous permettra éventuellement de faire des comparaisons sur les vols observés.

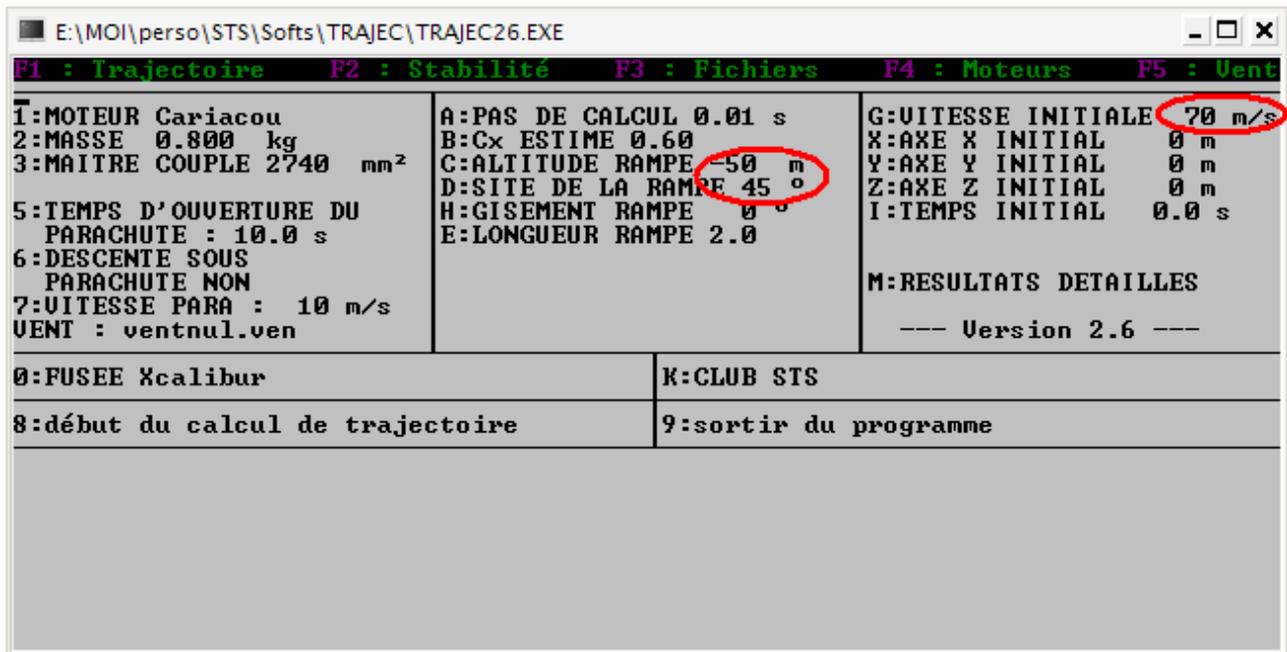
Les paramètres prévisionnels tiennent compte de l'envergure limitée disponible entre les hélices du porteur.



les caractéristiques prévisionnelles d'Xcalibur, capture d'écran du logiciel TRAJECT

L'intérêt du document résidant dans l'analyse de risques, le vol de la minifusée sera dans un premier temps simulé avec les paramètres correspondant à la plus grande portée balistique :

- altitude : 50 m (maximale)
- vitesse initiale : 70 m/s (maximale)
- inclinaison : 45°, correspondant au "pire cas" en termes de portée balistique
- poids : 0,8 Kg (minoré)

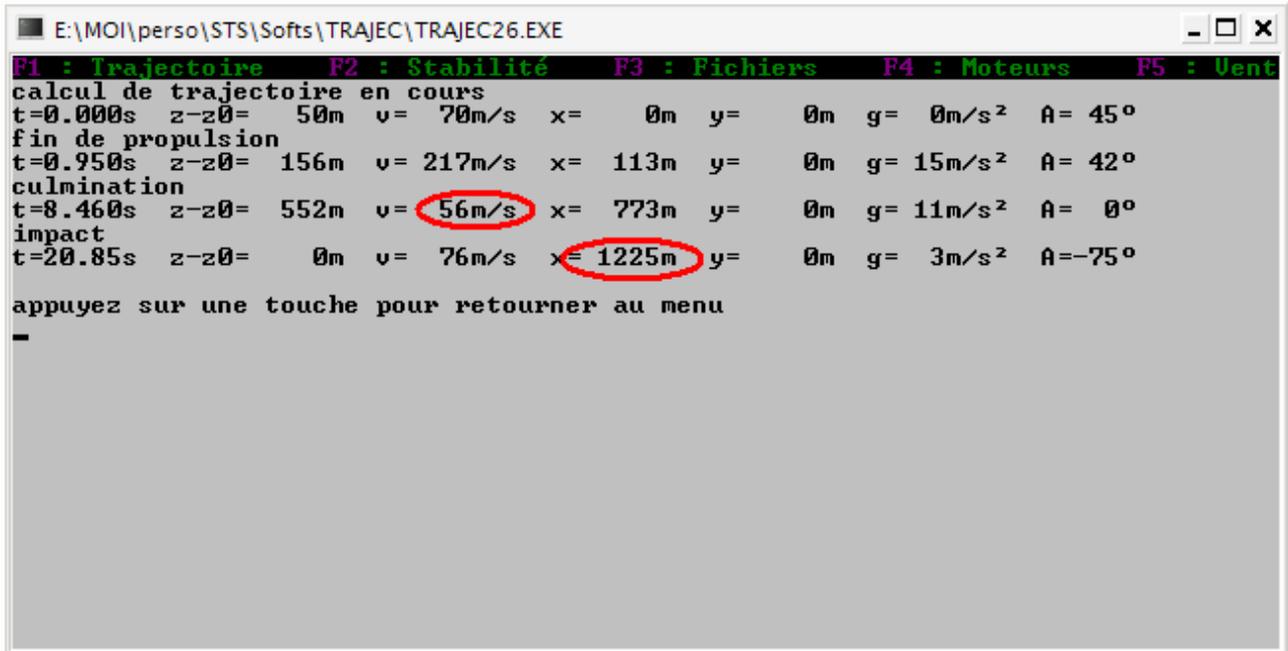


*les caractéristiques de lancement, capture d'écran du logiciel TRAJEC*

Pour que le vol de Xcalibur ne représente pas de danger, deux conditions doivent être respectées :

-Le porteur doit être orienté dans le même sens que les rampes, malgré une inclinaison moindre. Cette condition est développée dans les chapitres précédents. L'orientation au lancement doit être garantie.

-La fusée est tirée au-dessus de la zone fusées expérimentales (domaine de vol autorisé). Sa portée balistique ne doit donc pas dépasser le gabarit fusex classique. Pour ce faire, nous comparerons les portées respectives de Xcalibur (Vinitiale=70m/s, Ainitiale=50m – noté -50 sous TRAJEC, Site=45°) et de la fusée expérimentale LaïKa (Vinitiale=0m/s, Ainitiale=0m, Site=75°, propulseur CHAMOIS, poids=9,5kg propulseur vide), dont les données – établies avant son vol en juillet 2005 – ont été validées lors des contrôles fusex. Cette Fusex a réalisé un vol parfaitement nominal.



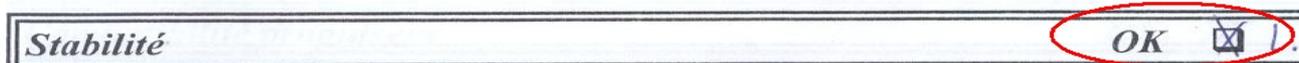
la simulation de vol d'Xcalibur, capture d'écran du logiciel TRAJEC

La portée maximale d'Xcalibur est : 1225m.

NOTE : la forte vitesse à culmination (56m/s=202Km/h) nous forcera à équiper l'engin d'un ralentisseur très robuste.

Vitesse à la culmination	49 m/s	58 m/s
Portée balistique	96 1415 m	1 131 m
Durée du vol balistique	29,80 s	30,9 s
Vitesse maximale	172 m/s	171 m/s
Accélération maximale	88 m/s <sup>2</sup>	88 m/s <sup>2</sup>

Remarques particulières :



Validation de stabilité de la fusée expérimentale LaiKa, copie du dossier de contrôle

La portée maximale de LaiKa est : 1415m.

La portée d'une fusée expérimentale étant nettement supérieure à celle d'Xcalibur, nous déduisons que les conditions de lancement sont réunies dès lors que le porteur se trouve dans la situation optimale décrite précédemment. Nous disposons en outre d'une certaine marge quant au gabarit de notre projet, mais retenons qu'une attention toute particulière devra être portée à la solidité du ralentisseur.

## *Qualification :*

Qualifications au sol et en vol, avant et pendant la campagne à La Courtine.

### **Essais au sol**

Les tests au sol sont de trois types :

–**bancs d'essai** : nous avons réalisé un banc d'essai moteur qui permet d'obtenir simultanément la tension et l'ampérage (donc la puissance) consommés, la poussée résultante, et les tours par minute effectués par l'hélice. Nous l'avons utilisé pour optimiser le choix et les réglages du système batteries + moteur + hélice + variateur, tracer la courbe de poussée des moteurs, et vérifier la tenue des batteries (autonomie ...) sur un profil de vol type (avec séquences de vol simple, ressources plein gaz, etc ...). Un second banc d'essai, dit "banc d'essai twinstar", permet de tester le fonctionnement des récepteurs ou modems (téléométrie Micav) en fonction de la distance à l'émetteur, ainsi que de valider le comportement de la centrale inertielle en ambiance vibratoire et à différentes attitudes. Il tient son nom de l'avion en polystyrène "twinstar" du commerce, qui est fixé dessus lors de ces tests. Cet avion sert également à des tests en vol sur l'avionique seule.

–**Simulations** : il est possible de coupler la carte Micav à un simulateur de vol (Flight Simulator, Flightgear), afin de tester les lois de commande, les algorithmes de navigation ou le plan de vol, et de se familiariser avec le maniement de la station sol. Des cartes de La Courtine peuvent être téléchargées sur Google Earth.

–**Maquette électrique** : avant d'être installés sur le porteur, les principaux composants de l'avionique (servomoteurs, récepteurs, basculeurs, commutateur de servomoteurs, ventouse ... ont été extensivement testés sur table, afin de vérifier par exemple que les servomoteurs ne bougent pas lorsque le basculeur du récepteur correspondant est actionné sur une panne bus principal pour passer sur la batterie redondante.

Nous proposons de répéter à la Courtine les tests suivants, en présence de l'autorité de sauvegarde :

### **Tests au sol en qualification campagne**

Essais de portée radio

Comportement des servomoteurs, et en particulier des interrupteurs électro-mécaniques, en cas de coupure de la radiocommande, commutation du basculeur d'alimentation, perte complète de l'alimentation : ils doivent rester en position "circuit ouvert".

Test du mécanisme d'éjection sans allumage de la minifusée (ventouse électromagnétique et ressort).

Test de l'éjection du parachute du porteur et de l'arrêt des moteurs sur ordre de la radiocommande sauvegarde.

Tests de la chaîne d'allumage (en remplaçant l'allumeur par une lampe !).

Tests de la minifusée (procédure habituelle de Planète Sciences : centrage, stabilité, tenue des ailerons, sortie parachute, etc.).

## Démonstrations en vol en qualification campagne

–Réalisation de la mission sans minifusée.

–réalisation de la mission avec minifusée inerte, sans largage, atterrissage avec la minifusée.

–réalisation de la mission avec largage de la minifusée inerte. Récupération de cette dernière sous son parachute.

–Peuvent être également envisagées une réalisation de la mission avec une fusée propulsée par un propulseur microfusée, ou une réalisation de la mission avec une "minifusée" dont le propulseur serait une bouteille de soda de 0.5L, remplie d'air comprimé à 5 bar (propulsion type "fusée à eau"). Nous envisageons la possibilité de réaliser ce dernier test avant La Courtine afin de valider la sortie de rampe d'une fusée propulsée. Un essai en vol (filmé) du parachute porteur est également envisagé, avant la Courtine, sur une ancienne version de Chevalier Noir.

Tous ces vols se font dans le cadre et le respect de la législation en vigueur sur l'aéromodélisme et les fusées à eau, à l'exception du lancement d'une microfusée qui ne pourrait être testé qu'en campagne (les textes existants mentionnent une rampe au sol, en plus de l'agrément microfusées). La législation sur l'aéromodélisme impose en particulier le vol à vue, et certaines bandes de fréquences radio. Le lancement de fusées inertes ou de fusées à eau n'est pas réglementé en tant que tel, mais peut s'inscrire dans l'aéromodélisme.

## *Conclusions sur la sauvegarde*

Afin de réaliser, pour la première fois, un dispositif de lancement aéroporté, nous avons présenté une approche de la sauvegarde "failsafe-failsafe" inspirée du monde Ariane, qui s'appuie sur sept piliers :

- 1)redondances matérielles : batteries de secours, deux chaînes de commande matériellement distinctes (RCVol et Micav)
- 2)chaîne de sauvegarde dédiée « safety », et matériellement indépendante des (deux) autres chaînes de commande
- 3)Complémentarité entre automatismes embarqués et observateurs ou pilotes humains au sol
- 4) Espionnage et télémétrie des liaisons les plus critiques
- 5)Actions de réduction de risque fondées sur des essais en vol et au sol, et l'utilisation de matériel éprouvé
- 6)Procédures strictes et nombreuses répétitions en vol de ces procédures
- 7)Qualification avant et pendant la campagne

Nous faisons en particulier un large usage d'une spécificité du dispositif de largage aéroporté Chevalier Noir + Xcalibur, par rapport aux fusées expérimentales habituelles (mono ou bi-étages) : la possibilité de procéder à des essais et démonstrations en vol avant et pendant la Courtine à des fins d'entraînement, de validation, de réduction de risques et de qualification.

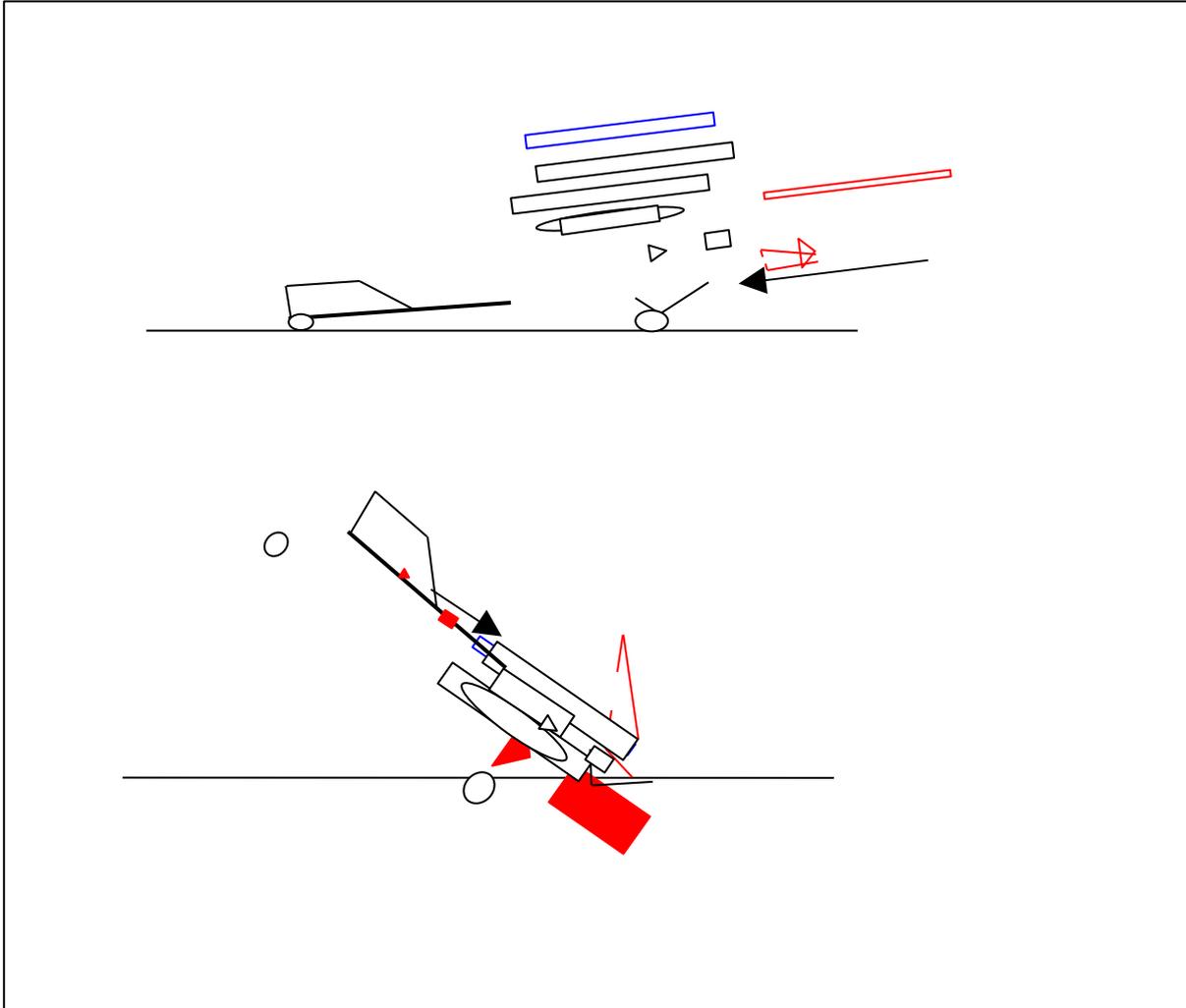
## *Annexe 1 : checklist pré-vol*

- 1) Inspection clefs d'ailes (2\*4 boulons)
- 2) fixation plaques moteurs (boulon plaque-moteur et boulon plaque-tubes alu carré)



- 3) charnières ailerons + stab (charnière cassées ? Gouvernes suffisamment emboîtées ?)
- 4) Boulon de fixation des ailes + dièdre : inspection visuelle d'un angle correct
- 5) Récepteur branché sur bus principal
- 6) corde à piano : en place sur les gouvernes et correctement reliées aux servomoteurs.
- 7) Inspection visuelle de tous les servomoteurs : présence de vis de fixation pour maintenir les bras de servomoteurs
- 8) Inspection train arrière, notamment ressorts
- 9) Inspection train avant : vérification du retour des amortisseurs + boulon de fixation + rotation des roues + pièce de maintien des roues sur leur axe
- 10) Vérification fixation hélices : enlever le cône puis vérifier le serrage des écrous puis remettre le cône en place
- 11) Vérification batteries vol, et batteries redondantes (testeur Futaba BR2000)
- 12) Branchement basculeur + système BEC (alimentation récepteur nominale) + batterie vol en backup (alimentation de secours, backup).
- 13) Vérifier position cavaliers sur basculeur selon voltage batterie vol (4.8V ou 6V)
- 14) Inspection des branchements basculeur -> récepteur, basculeur -> BEC et basculeur -> batterie vol.
- 15) Vérification et réglage fin des trims, débattements et sens servos.
- 16) Branchement Micav + PRST
- 17) Branchement des moteurs+ varios, test
- 18) essai de roulage
- 19) Test des gouvernes
- 20) Vérification réception Micav moteurs allumés en roulant (sur PC réception des signaux avec les moteurs allumés)

## *Annexe 2 : Mise en place de la minifusée et de la charge pyrotechnique sur l'avion porteur*



L'intervention du pyrotechnicien, éventuellement accompagné d'un membre de STS et muni d'une checklist précise, photos comprises, débute récepteurs vol et sauvegarde coupés, récepteurs éteints (non alimentés), ce qui exclut toute fermeture des interrupteurs électro-mécaniques. Le propulseur est mis en place, on allume dans un premier temps la radiocommande sauvegarde, puis le récepteur sauvegarde. La position des interrupteurs électro-mécaniques associés IEM2, IEM3 et IEM4 est vérifiée visuellement (ils doivent être ouverts). On allume ensuite la radiocommande de vol, puis le récepteur vol. La position de l'interrupteur électro-mécanique associé IEM1 est vérifiée visuellement, ainsi que celle de IEM2 à nouveau (ils doivent être ouverts). Un essai de IEM1 est ici proposé (il doit se fermer, puis se rouvrir sur commande de RCVol). La présence de IEM2 (ouvert), IE (ouvert, Micav étant éteint) et de la barrière mécanique BM élimine tout risque d'allumage intempestif lors de ce test. Le calculateur embarqué Micav est ensuite allumé. La télémétrie est vérifiée en tente Jupiter (opérateur station sol), en particulier centrale inertielle, GPS (probable temps d'intialisation nécessaire), et espionnage des récepteurs vol et sauvegarde. Le pilote actionne successivement toutes les gouvernes. Il est à ce stade établi que toutes les barrières électro-

mécaniques, et la barrière électrique (IE) sont en ordre et fonctionnent, et que la télémétrie est opérationnelle. Après un dernier contrôle de la position (ouverte) de tous les interrupteurs électromécaniques, la barrière mécanique est retirée. Le pyrotechnicien s'éloigne, en vue du décollage de Chevalier Noir. Un dernier test des casques radio reliant les opérateurs (station sol, sauvegarde, pilote) est effectué. La mission peut commencer ...

## *Annexe 3 : processeur embarqué Micav*

MICAV 2.0

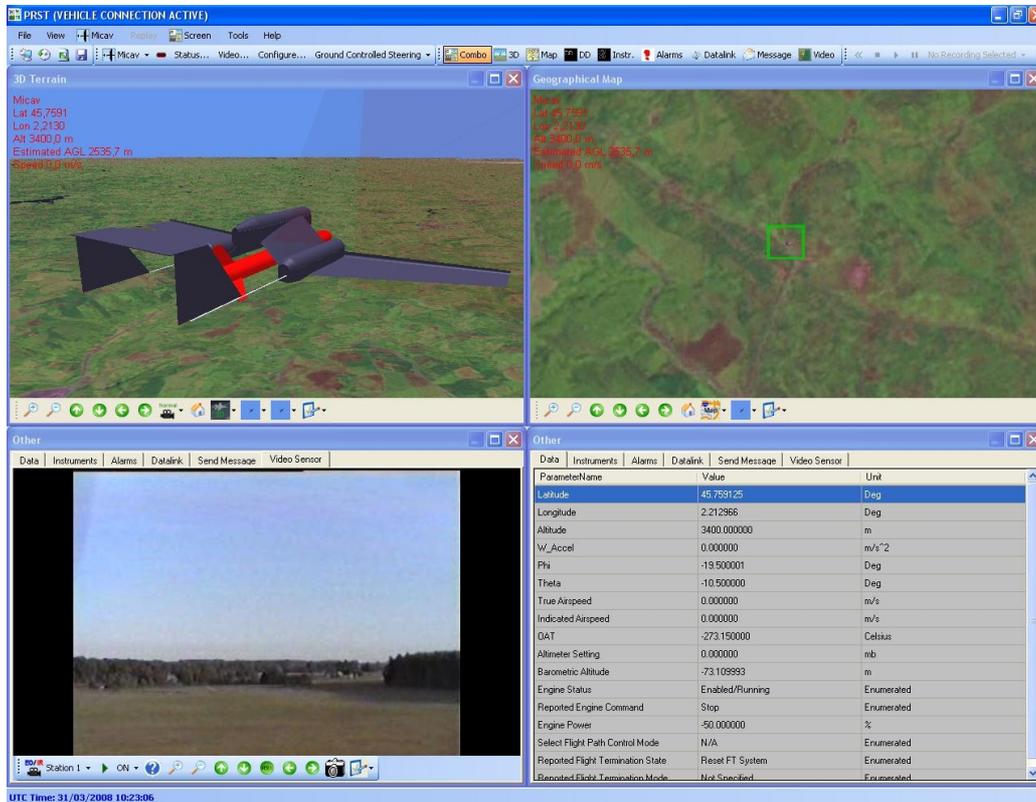


**General features**

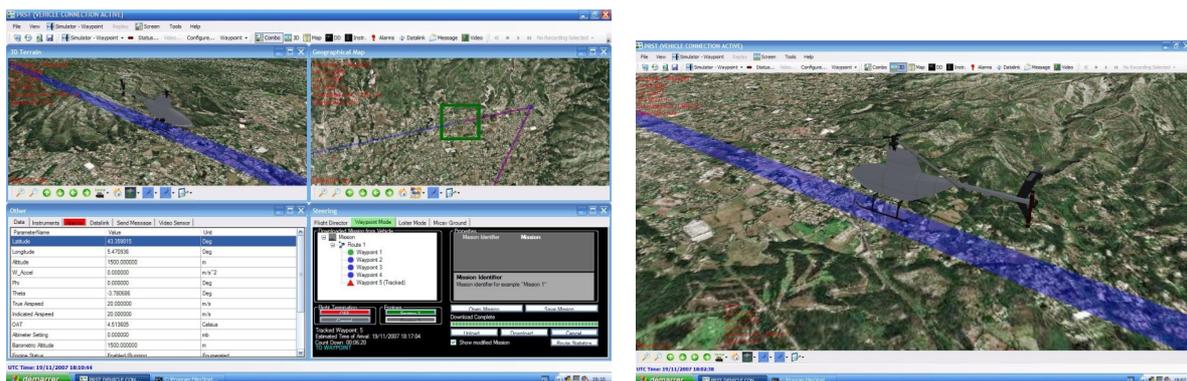


- Multi-platforms autopilot for U.A.V.
- Board size 10.1 x 4.1 cm<sup>2</sup> or rugged enclosure according to needs
- Dual processor (1 for Sensors management / 1 for flight management and communication)
  - Internal long range modem (up to 32 km)
  - Highly professional 9 DoF digital Inertial Measurement Unit
    - Internal 3-axis magnetometer
    - Pressure sensor, airspeed sensor
      - 6x analog ports (12 bits)
        - 2x I2C bus
        - 2x SPI ports
    - 3x serial port for external modules
      - 12 directly connectable servos
  - Up to 36 connectable servos with an external board(s)
    - Needed supply voltage from 4.5V to 18V
  - 3.3 and 5V internal supplies for servos, and external payloads
  
- Control by Joystick or PRST GUI
  - Camera POD control capability
- Embedded RTC for sensitive missions
  
- Powered by the *Instrument Control Sweden* PRST ground station software
  - 7 control modes
- Kalman filtering, "State feedback" algorithms, GPS navigation
  - In flight adjustable "State feedback" gains
  - In flight adjustable mission plan

## Annexe 4 : Station sol PRST



PRST, Chevalier Noir et Xcalibur



Captures d'écran PRST

The PRST Software suite from Instruments Control Sweden (ICS) consist of four main components, all intended to facilitate the creation of a STANAG 4586 compatible UAV system. The STANAG (STANDARDIZATION AGREEMENT) 4586 is a specification which will allow members of the NATO alliance to share information obtained by their Unmanned Air Vehicles (UAVs). The STANAG 4586, entitled "Standard Interfaces of the Unmanned Control System (UCS) for NATO



UAV Interoperability", is still within the ratification process. Our implementation is based on the latest documents released from NATO which is Edition 2 Errata 5.

## PRST Base System

The PRST is a general ground Core UAV Control Station (CUCS) which also has the ability to control UGVs and UUVs. The system is not limited to only one vehicle at a time but can receive data from multiple vehicles in parallel thereby enabling it to combine data from several sources. The Graphical User Interface (GUI) is extendable and based on displays contained in DLLs. All displays can be resized and positioned individually to any configuration. Display configurations can be saved and automatically loaded. The GUI also allows displays to be positioned across multiple monitors. The number of monitors that can be used with the system is only limited by the Windows XP / Windows Vista operating system which, without third party applications, supports up to 10 monitors. The PRST Base System supports up to interoperability level 4 (LOI) of the STANAG 4586, which means that it doesn't include launch and recovery of the UAV. According to the STANAG 4586 there are no generic messages for these procedures because they should be implemented using user defined messages.

### Features:

- Steering Mode Selection. Currently supported steering modes are Waypoint, Loiter point and manual
- Joystick Input Control.
- Subsystem Status Alert Alarm Panel with Alarm Text display. Support for user defined messages for sending JPEG images and HTML files from VSM to PRST system upon alarm indication.
- Vehicle Light Control Panel for standard lights (Nav, Nav IR, Strobe, Strobe IR, NVD, reserved, Landing, Landing IR)
- Complete recording/replay capability of telemetry and video.
- Ground Collision Warning System.
- Remote Display Support (HTTP and Java Script).
- Windows XP and Windows Vista compatible.

### Mission Planner (Purchased Separately)

To support the creation of waypoint lists for Steering Mode "Waypoint" we have developed a separate application which makes use of the 3D Terrain Display and the Map displays mentioned above. Each Mission is saved as a XML file and can be edited later. Included is an altitude graph which draws a terrain profile when 3D terrain database coverage is available.

### Features:



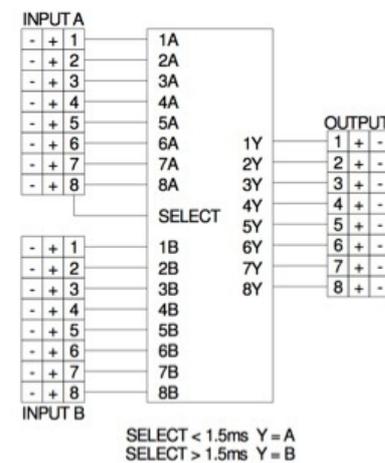
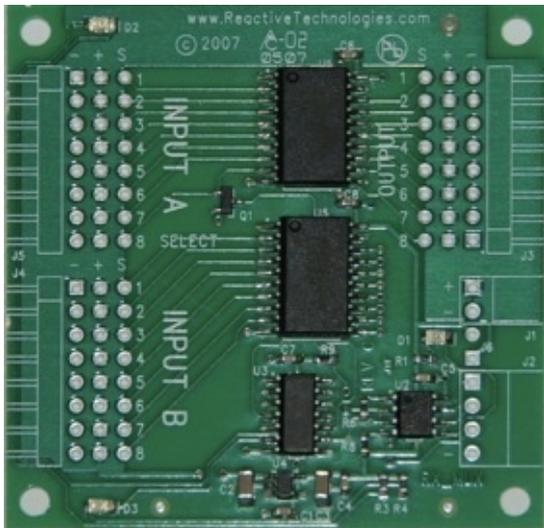
## CLUB SWIFT TUTTLE SPACE – "projet Chevalier Noir" – dossier de sauvegarde

- Mission New / Open / Save functionality
- Altitude Graph for terrain profile with below ground warning.
- Sensor Control
- Parallel visualization of path in both 3D and map.
- Waypoint action settings.
- Ground Collision Warning System.

### Report Wizard (Purchased Separately)

Report Wizard is used to facilitate the creation of reports after a mission. It enables the user to quickly indicate objects of interest during a mission by a simple mouse click in the Video Sensor Control Display, for example threats, and then go through this list after the mission to comment and identify the objects. When the user is finished a report is generated as an PDF, Word or Excel document. The report is stored in a SQL database file to separate different vehicles and report occasions.

## Annexe 5 : Commutateur de servos



### General Description

The RxMux allows control of a set of R/C servos from two different signal sources. Signal sources such as R/C receivers, autopilots, microcontrollers, etc. are connected to Input A and Input B. Standard R/C servos are connected to the Output. Switching between the two sources is accomplished by sending the appropriate width servo signal on the Select input channel (Input A, Channel 8). When a servo signal less than 1.5ms wide is detected, signals connected to Input A are sent to the Output. A servo signal wider than 1.5ms will send connected signals at Input B to the Output. When no servo signal is detected at the Select input, the RxMux will default to connecting Input A to the Output.

The RxMux is best used as a component in a well planned system. By itself, the RxMux does not perform any failsafe, redundancy, or protection services. Although the RxMux will default to Input A in the absence of any Select input signal, this is not a reliable failure mode. Most R/C receivers will output some signal even when they are not receiving a valid transmission (this is one cause of servo glitches). The use of PCM receivers with appropriate failsafe programming is recommended. In most applications, an external device must provide the intelligence to determine which input should be selected and send that choice to the RxMux. Please see the application example for more information.

## Features

1. › Drives R/C servos from one of two groups of R/C servo inputs
2. › Selection between inputs is controlled using a standard R/C servo signal
3. › Logic level and servo signal selection indicator outputs
4. › Designed for battery operation from 4 or 5 NiCD/NiMH cells (3.6V to 7.5V)
5. › Connector pinouts compatible with R/C servo headers
6. › Power may be provided via a separate power connector
7. › All power and ground inputs are bussed together respectively

## Annexe 6 : Ventouse électro-magnétique



Mise en contact/mise hors contact

- Gammes d'arrêts de porte électromagnétiques sous tensions, utilisables dans les hôpitaux, les hôtels, les écoles etc...  
Permet le maintien sans énergie idéal pour les applications de sécurité.  
L'aimant doit être associé à un plateau métallique disponible séparément.  
Variation du magnétisme résiduel (en valeur nominale : 10 % de la force de maintien) en fonction de la température des bobines.  
Évitez les températures trop élevées et les charges dynamiques, elles pourraient en effet endommager l'aimant permanent.

### Spécifications techniques

Taille aimant/armature (mm)	035
Force de maintien (N)*	210
Tension d'alimentation	
c.c.	24
c.a.	240
Puissance nominale des bobines c.c./c.a.	Impulsion/Impulsion
Consommation (W)	6·6
Poids des aimants (g)	280

