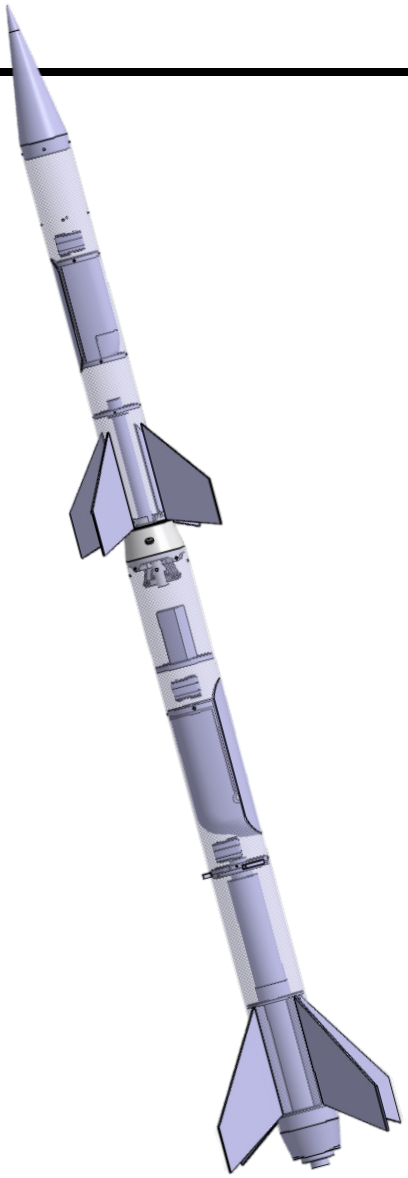
AéroIPSA
63 bvd de Brandbourg
94200 Ivry-sur-Seine

SP - 02

Fusée bi-étage AéroIPSA 2025-2026
Rapport de projet



Rédacteurs du document :
- AMARANTI Malo
- PAILLARD Alexis
- PICHON Lucas
- LE CAM Maxens
- PEIX Guillaume

Aout 2026

Table des matières

1 Electronique **4**
1.1 Système électronique général . . . 4
1.1.1 Principaux éléments du système . . . 5
1.1.2 Interactions entre les éléments du système . . . 5
1.1.3 Cartes électroniques . . . 6
1.2 Boucles de détections évenementielles . . . 7
1.3 Séquenceurs . . . 10
1.3.1 Présentation générale . . . 10
1.3.2 Architecture matérielle . . . 11
1.3.2.1 Entrées / sorties . . . 11
1.3.2.2 Alimentation électrique . . . 11
1.3.2.3 Choix du microcontrôleur . . . 11
1.3.2.4 Moyen de détection d'attitude . . . 12
1.4 Interface Homme Fusée . . . 13
1.5 Servomoteurs . . . 14
1.6 Ligne de mise à feu . . . 15
1.6.1 Principe de fonctionnement . . . 15
1.6.2 Interface . . . 18
1.6.3 Séquence de vol . . . 19
1.7 Expérience Apex . . . 20
1.7.1 Exigences et besoins . . . 20
1.7.2 Module Apex et limitations . . . 21
1.7.3 Module ApexEx . . . 22
1.7.4 Système expérimental Apex . . . 23
1.7.4.1 Mesure de la vitesse aéronautique . . . 23
1.7.4.2 Chaines de télémesures . . . 24
1.7.4.3 Communication avec le séquenceur . . . 25
1.7.4.4 Interface avec le système de caméra embarqué . . . 26
1.7.4.5 Encombrement des bus de communications . . . 26
1.8 Caméra embarquée . . . 27
1.9 Alimentations et masses électriques . . . 28
1.9.1 Architecture d'alimentation électrique . . . 28
1.9.1.1 Séquenceur . . . 28
1.9.1.2 Expérience . . . 29
1.9.1.3 Ligne de mise à feu . . . 29
1.9.2 Masses électriques . . . 29

Liste des figures **30**

Liste des tableaux **30**

Références **31**

Glossaire et acronymes **32**

A Synoptique de l'ensemble de la fusée **34**
A.1 Deuxième étage . . . 34
A.2 Premier étage . . . 35

B Plan mécaniques **36**
B.1 Système d'aérofreins . . . 36
B.2 Séparation inter-étage . . . 42
B.2.1 Deuxième étage . . . 42
B.3 Crochet de trappe du deuxième étage . . . 44
B.4 Système de maintien de la pointe de coiffe . . . 45
B.5 Pointe de coiffe . . . 46

C Schématiques électriques **47**
C.1 Apex 47
C.2 ApexEX 49
C.3 Pitot 50
C.4 Caméra 51
C.5 Sequenceur 52
C.6 IHF 54
C.7 Allumage 55
C.8 Condensateurs 56
C.9 Connexion séparation inter-étage 57
C.10 Routeur 58

1 Electronique

Cette section présente les différents éléments électroniques embarqués à bord de la fusée SP-02. Nous y aborderons :

1. La présentation générale du système électronique ;
2. Les boucles électroniques évènementielles ;
3. Le séquenceur ;
4. L'interface homme-fusée ;
5. Les servomoteurs utilisés ;
6. La ligne de mise à feu du moteur du deuxième étage ;
7. Le système expérimental APEX ;
8. Le système de caméras embarquées ;
9. Le systèmes d'alimentation électriques.

1.1 Système électronique général

Les systèmes électroniques embarqué à bord des deux étages de la fusée ont été conçus pour être sensiblement similaires, afin de faciliter le développement, la maintenance et les opérations au sol. Les seules différences notables entre les deux étages sont au niveau de la ligne de mise à feu du deuxième étage.

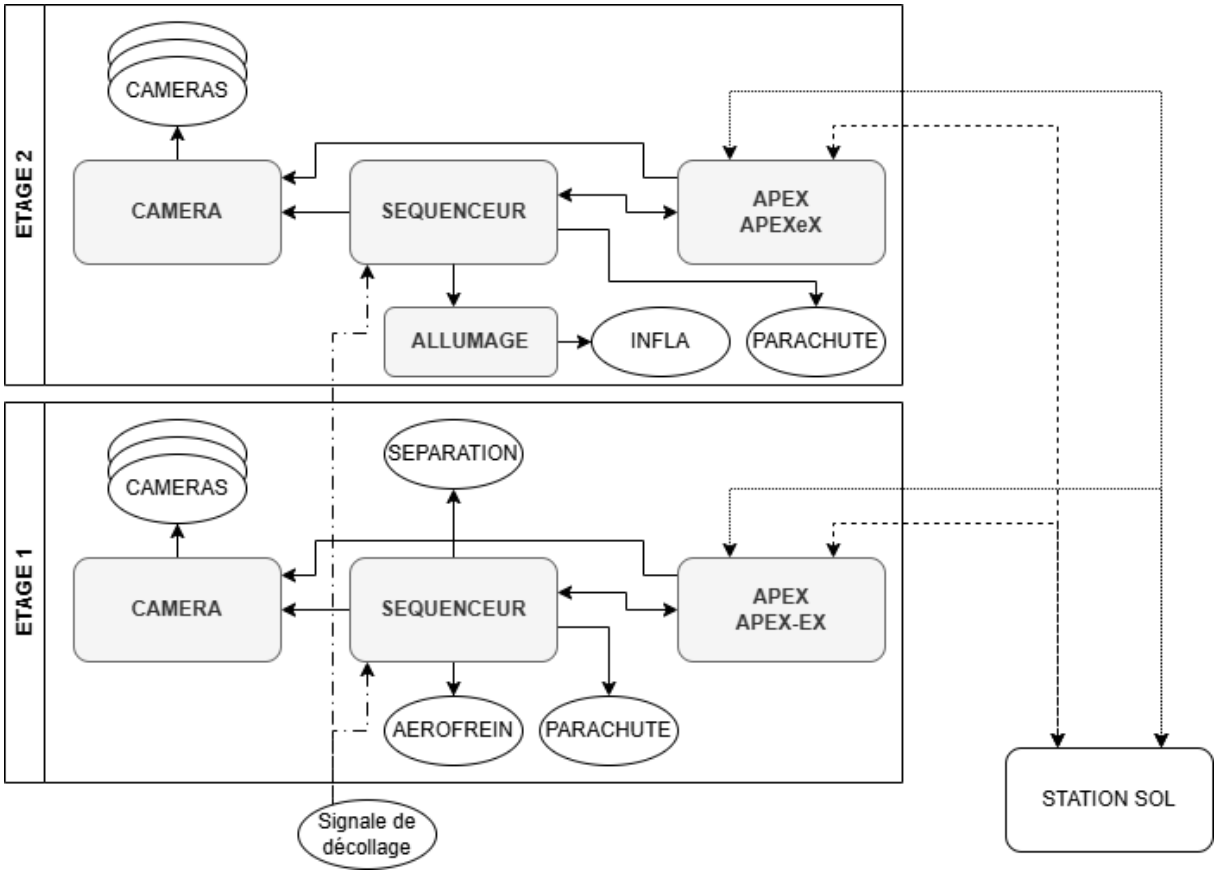


FIGURE 1.1 – Schéma simplifié du système électronique général de la fusée SP-02

Le schéma ci-haut (figure 1.1) présente de manière simplifiée les différents éléments du système électronique général de la fusée SP-02 et leurs interactions.

Un schéma amplement plus détaillé est présenté en annexe A. Ce schéma ne figure pas dans le corps du rapport pour des raisons de lisibilité, mais est essentiel pour comprendre les différentes interactions entre les éléments du système électronique et doit être vu comme la synthèse référente principale.

1.1.1 Principaux éléments du système

On distinguera quatres principaux éléments :

- **SEQUENCEUR** : Responsable de la gestion de tous les événements critiques de la mission et de leur synchronisation. C'est lui qui déclenche les différentes étapes de la mission, comme le déploiement des aérofreins, la séparation des étages, la commande mise à feu du moteur et le déploiement des parachutes.
- **ALLUMAGE** : Circuit de commande de la ligne de mise à feu du moteur. Son rôle est de fournir la puissance nécessaire pour allumer le moteur lorsque le séquenceur l'ordonne mais également d'isolé l'inflamateur moteur de toute source d'énergie le reste du temps, afin de maintenir un niveau de sécurié suffisant pour les opérateur pyrotechnique au sol.
- **APEX - APEXeX** : Comme énoncé plus tôt dans ce document, le projet SP-02 embarquera une carte APEX pour réaliser l'ensemble des mesures d'enregistrement et d'envoi par télémesure des données de mission. Elle sera accompagnée d'une carte APEXeX [1], qui est une extension de la carte APEX, pour permettre d'embarquer davantage de capteurs et d'interfaces de communication ainsi que l'ajout d'un module de télémesure supplémentaire. Par la suite, dans ce document, nous utiliserons le terme APEX pour faire référence à l'ensemble de la carte APEX et de sa carte d'extension APEXeX.
- **CAMERA** : Système de gestion des caméras embarquées, qui comprend la gestion de l'alimentation des caméras, leur déclenchement et l'enregistrement de données vidéos.

1.1.2 Interactions entre les éléments du système

- **SEQUENCEUR** $\longrightarrow$ **SOL** : Le séquenceur détecte le décollage de la fusée via l'arrachage d'un connecteur branché à la rampe de décollage.
- **SEQUENCEUR** $\longrightarrow$ **AEROFREIN** : Le séquenceur du premier étage contrôle le servomoteur du système de déploiement des aérofreins.
- **SEQUENCEUR** $\longrightarrow$ **PARACHUTE** : Chaque séquenceur contrôle le servomoteur du système de déploiement du parachutes de l'étage dans lequel il se trouve.
- **SEQUENCEUR** $\longrightarrow$ **SEPARATION** : Le séquenceur du premier étage contrôle le servomoteur du système de séparation.
- **SEQUENCEUR** $\longrightarrow$ **ETAGE** : Chaque séquenceur est branché à un circuit passant par l'étage dans lequel il ne se trouve pas. Ainsi, lors de la séparation, ce circuit s'ouvre ce qui permet la détection de la séparation.
- **SEQUENCEUR** $\longrightarrow$ **ALLUMAGE** : Lorsque le séquenceur du dexuième étage donne l'odre de la mise à feu du deuxième moteur, il envoie un signal au circuit d'allumage.
- **SEQUENCEUR** $\longleftrightarrow$ **APEX** : Le séquenceur de chaque étage est connecté à APEX de son étage respectif, lui permettant de lui envoyer des informations sur la temporalité des événements critiques de la mission. Cela permet à APEX d'inclure la date de ces événements à sa chaine de données afin de faciliter l'analyse post-vol. La chaine de communication entre le séquenceur et APEX est bidirectionnelle par construction (utilisation d'une liaision UART) ce qui rend possible l'envoi de commandes d'APEX vers le séquenceur, voire du sol vers le séquenceur par radio via APEX pour par exemple effectuer de la paramétrisation et des tests au sol en séquence de pré-vol. Cela n'a cependant pas été considéré comme une fonctionnalité nécessaire à exploiter pour la campagne C'space de 2027.
- **SEQUENCEUR** $\longrightarrow$ **CAMERA** : Le séquenceur de chaque étage est connecté au système de gestion des caméras de son étage respectif, lui permettant de déclencher les caméras embarquées à des moments clés de la mission.
- **APEX** $\longrightarrow$ **CAMERA** : APEX de chaque étage est connecté au système de gestion des caméras de son étage respectif, lui permettant de déclencher les caméras embarquées à distance via des commandes envoyées par télémesure depuis le sol, ou de manière autonome en fonction de la logique de vol programmée dans APEX.
- **APEX** $\longleftrightarrow$ **STATION SOL** : APEX de chaque étage est connecté à la station sol via deux modules de télémesure, lui permettant d'envoyer des données en temps réel vers le sol et de recevoir des commandes depuis le sol.

1. Parfois également noté ApexEx.

1.1.3 Cartes électroniques

Catégorie	Nom	Description	Etage 1	Etage 2	Total
Expérience	Apex	Carte principal d'acquisition des données de vol et de logique	1	1	2
	ApexEx	Carte d'extension d'Apex	1	1	2
	Pitot	Carte support de capteur de pression de la pointe	0	1	1
	Caméra	Carte de contrôle des caméras	1	1	2
Séquenceur	Séquenceur	Carte séquenceur	1	1	2
	IHF	Carte Interface Homme Fusée	1	1	2
	Allumage principale	Carte servant de logique de puissance et d'interface du système d'allumage	0	1	1
	Condensateur	Banque des condensateurs du système d'allumage	0	1	1
Divers	Connecteur séparation	Connecteur d'interface entre les deux étages	2	0	2
	Routeur	Carte servant d'interface entre le séquenceur de l'étage, le jack et les connecteurs de la séparation	1	1	2
			8	9	17

Table 1 – Présentation de l'ensemble des cartes électroniques

Les cartes électroniques embarquées à bord de la fusée SP-02 sont présentées dans le tableau ci-dessus. L'intégralité des schémas électriques de ces cartes sont présentés en annexe C.

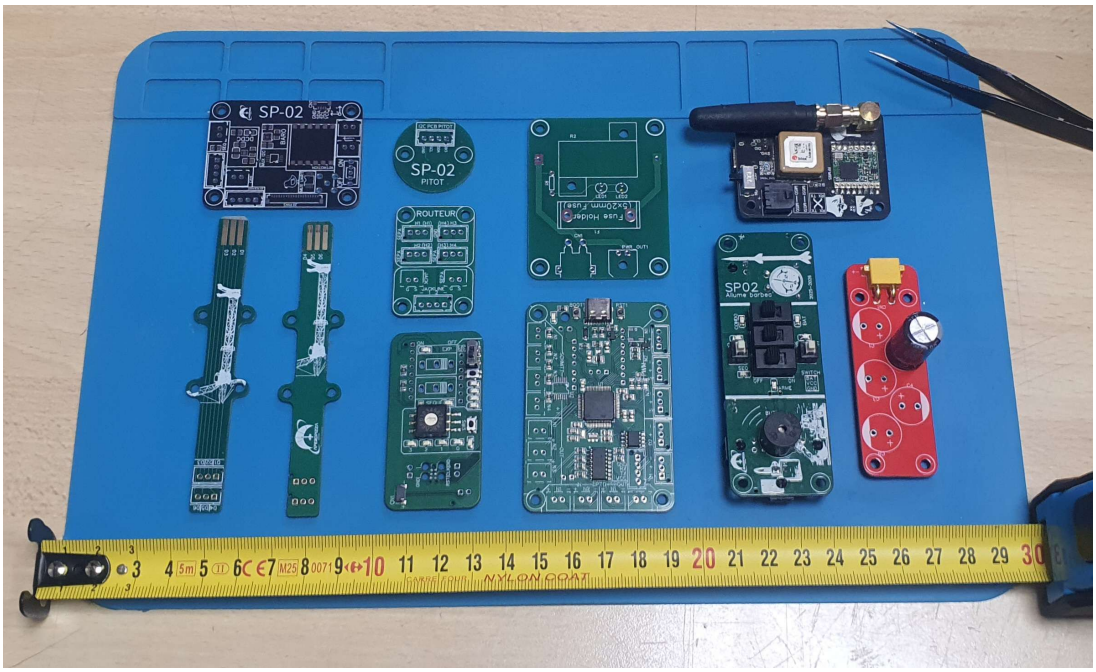


Figure 1.2 – Vue d'ensemble des types de cartes électroniques embarquées à bord de la fusée SP-02

La figure 1.2 présente une vue d'ensemble des différents types de cartes électroniques qui ont été développées. A noter qu'à cette ensemble, il manque la carte caméra, que la carte se situant au dessus du séquenceur n'est pas cité dans le tableau précédent puisque c'est une carte de test et que la carte condensateur (en rouge) est une ancienne version.

1.2 Boucles de détections évenementielles

Deux évenements critiques de la mission sont détectés électroniquement par le système embarqué : le décollage et la séparation inter-étage.

Chaque séquenceur possède des connecteurs JST de deux pins composés d'un signal d'entrée configuré en pull-up et d'une masse. Chacun de ces connecteurs peut servir à mesurer un évenement en créant une boucle de courant entre ses deux pins. Le séquenceur peut alors déterminer l'état (fermé ou ouvert) de ces boucles en mesurant le niveau logique du signal :

— Boucle fermée : le signal est connecté à la masse en basse impédance ⟶ 0 V mesuré ;

— Boucle ouverte : le signal est connecté à la tension d'alimentation en haute impédance ⟶ 3,3 V mesuré.

Les séquenceurs de chaque étage utilisent deux de ces connecteurs pour la détection du **décollage** et de la **séparation inter-étage**. Le schéma de principe de ces boucles de détection avec l'utilisation de la carte routage est présenté à la figure 1.3 ci-dessous.

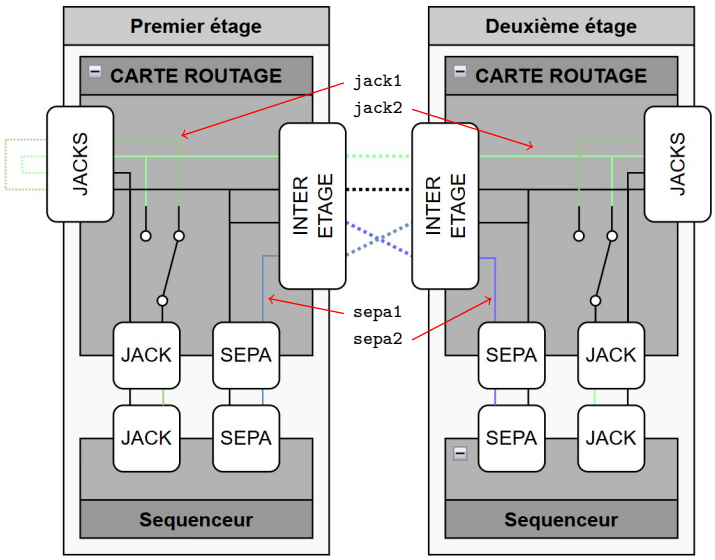


FIGURE 1.3 – Système de détection du décollage et de la séparation inter-étage

Les connexions **vertes** représentent la boucle du décollage et les connexions **bleues** celle de la séparation inter-étage. Les connexions noires représentent les masses (communes lorsque les étages sont connectés).

Les cartes de routage sont les mêmes sur le premier et le deuxième étage. La seule différence est la configuration du connecteur `JACK`[2] branché au séquenceur. Schématisé sur la figure 1.3 par un interupteur, la carte possède deux empruntes de résistance zéro ohm permettant de choisir entre deux configurations : une pour le premier étage et une pour le deuxième étage. En effet nous voulons que chaque étage ait sa propre boucle de détection de décollage et de la séparation inter-étage tout en gardant un design unique de PCB pour les deux étages.

Il y a donc 4 signaux distincts : `jack_1` et `sepa_1` pour le premier étage et `jack_2` et `sepa_2` pour le second. `sepa_1` et `sepa_2` ne se retrouvent jamais sur une même carte électronique au vu de la symétrie du système ce qui n'est pas le cas pour `jack_1` et `jack_2`. Le signal `jack_1` n'est branchée qu'au connecteur nommé `JACKS` tandis que le signal `jack_2` est également branché au connecteur `INTER ETAGE` lui permettant de traverser les deux étages. Ainsi :

— Pour le premier étage, le signal `jack_1` part du séquenceur du premier étage, arrive sur la carte de routage du premier étage au travers du connecteur `JACK`, sort de la carte par le connecteur `JACKS` où la boucle est formée.

— Pour le deuxième étage, le signal `jack_2` part du séquenceur du deuxième étage, arrive sur la carte de routage du deuxième étage au travers du connecteur `JACK`, sort de la carte par le connecteur `INTER ETAGE`, rentre dans la carte routage du premier étage et enfin sort de cette dernière par le connecteur `JACKS` où la boucle est formée.

2. Dans l'association, nous avons pris l'habitude d'associer le terme "jack" avec le système permettant de détecter le décollage d'une fusée. Cela vient du fait que dans la majeur partie de nos fusée, ce système est composé d'un jack audio, connecteur jugé très fiable et robuste pour ce type d'application.

Le connecteur `INTER ETAGE` schématisé sur la figure 1.4 représente en réalité un ensemble de 4 connecteurs JST 3 broches offrant un total de 12 connexions depuis la carte routage. Sur le premier étage, ces 12 broches sont réparties sur 2 cartes PCB dit "connecteur séparation" (figure 1.5) nommés `PCB_SEPA_[1,2]`, tandis que sur le deuxième étage, ces broches sont réparties sur 2 connecteurs de bord de carte (figure 1.6b) nommés `EDGE_CONNECTOR_[1,2]`. Lorsque les deux étages sont assemblés, les `PCB_SEPA_1` et `PCB_SEPA_2` du premier étage rentrent dans respectivement dans les `CONN_SEPA_1` et `CONN_SEPA_2` du deuxième étage, assurant ainsi la continuité des signaux entre les deux étages. Quatre signaux doivent passer par ce connecteur : `jack_2`, `sepa_1`, `sepa_2` et la masse. Avec 12 broche, il est alors possible d'obtenir une redondance de 3 broches par signaux afin d'assurer la continuité du signal même en cas de défaillance d'une broche ou de mauvais contact.

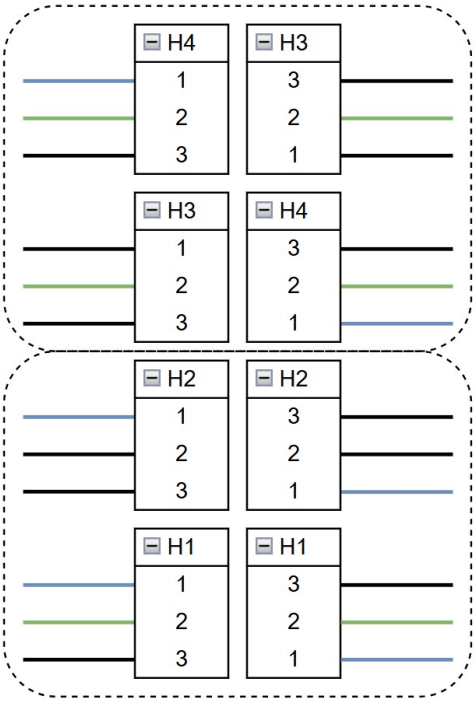


Figure 1.4 – Schéma de la connexion inter-étage

Figure 1.5 – PCB "connecteur séparation" du premier étage

Nous avons créer une nomencalture pour les 4 JST sortant de la carte routage des étages : `H1`, `H2`, `H3` et `H4` et établie une règle de connexion pin à pin de ces connecteurs.

Ainsi nous avons :

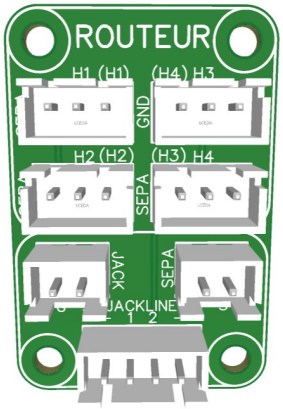
- `H1` $\Longleftrightarrow$ `H1`
- `H2` $\Longleftrightarrow$ `H2`
- `H3` $\Longleftrightarrow$ `H4`
- `H4` $\Longleftrightarrow$ `H3`

Avec également la règle de connexion pin à pin suivante :

- Pin 1 $\Longleftrightarrow$ Pin 3
- Pin 2 $\Longleftrightarrow$ Pin 2
- Pin 3 $\Longleftrightarrow$ Pin 1

Toutes ces règles de connexion peuvent être visualisées sur la figure 1.4 ci-contre.

Ainsi on peut lire par exemple que la broche 1 d'un connecteur `H3` doit être connecté à la broche 3 du connecteur `H4`. Aussi, les JSTs `H1` et `H2` sont regroupés sur un premier ensemble `[PCB/CONN]_SEPA_1` et les JSTs `H3` et `H4` sur l'autre ensemble `[PCB/CONN]_SEPA_2`.



(a) PCB de routage du système de détection du décollage et de la séparation inter-étage

(b) Connecteur de bord de carte se trouvant sur la partie du système de séparation du deuxième étage

Figure 1.6 – PCB routage et connecteur de bord de PCB

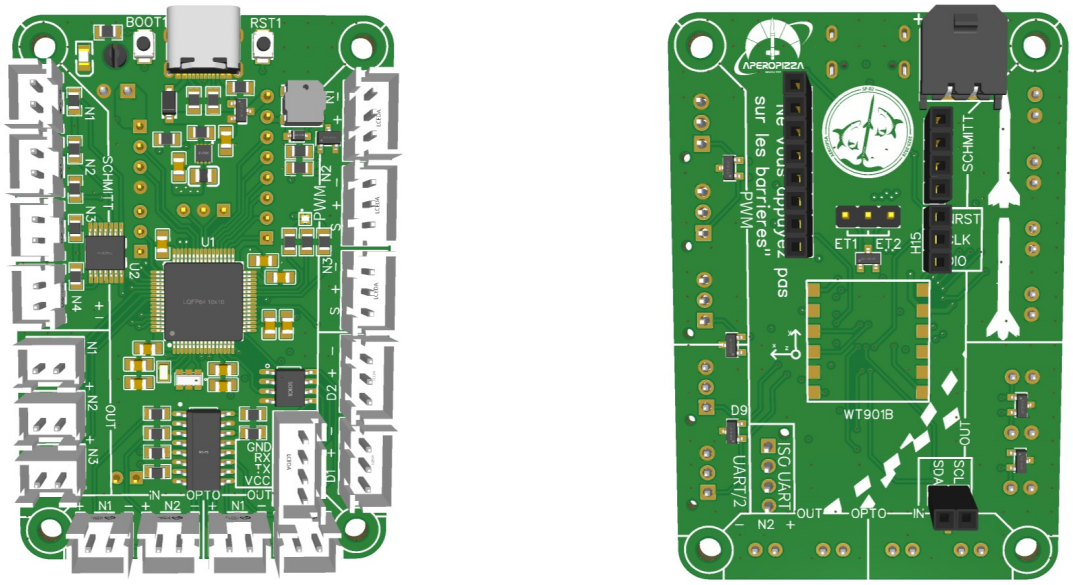
[METTRE PHOTO SEPARATION]

[METTRE PHOTO CIRCUIT ROUTAGE]

1.3 Séquenceurs

1.3.1 Présentation générale

Les deux étages de la fusée SP-02 sont chacun équipés d'un séquenceur embarqué identique, développé pour gérer de manière autonome l'ensemble des événements critiques du vol et assurer la conformité au CDC Fusex. Cette architecture commune facilite la fabrication, les essais et la maintenance, tout en permettant une configuration logicielle propre à chaque étage.



(a) face avant

(b) face arrière

FIGURE 1.7 – Rendu 3D de la carte séquenceur

La face avant de la carte séquenceur (1.7a) est le côté dirigé vers l'intérieur de la fusée, tandis que la face arrière (1.7b) est orientée vers l'extérieur. Ainsi l'ensemble des connecteurs, hormis ceux de la batterie et de ceux de la carte IHF, sont orientés vers l'intérieur de la fusée pour faciliter l'intégration. Ceux de la carte IHF sont orientés de telle sorte à ce que cette dernière soit accessible depuis l'extérieur de la fusée.

Chaque séquenceur assure notamment :

- la détection du décollage via la coupure de la boucle *jack* ;
- le démarrage du chronomètre interne servant de référence aux fenêtres temporelles ;
- le pilotage du système de récupération (parachute, trappe) ;
- la supervision de la séparation inter-étage et l'inhibition des actions en cas d'anomalie.

Le séquenceurs du première étage devra en plus se charger :

- du pilotage du système d'aérofreins ;
- du déverrouillage du mécanisme de séparation.

Le séquenceur du second étage devra quant à lui gérer :

- de la détection de l'attitude de la fusée ;
- de l'allumage du moteur du second étage.

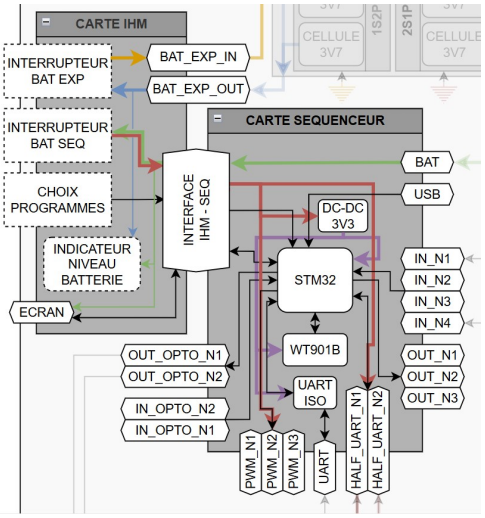


FIGURE 1.8 – Zoom sur le séquenceur et interface

Le synopsis figure 1.8 présente le séquenceur ainsi que la carte interface.

1.3.2 Architecture matérielle

1.3.2.1 Entrées / sorties

La carte intègre :

- 1 connecteur Molex Micro-Fit 3.0 pour la batterie
- 4 entrées conditionnées par portes à hystérésis de type *Schmitt trigger* précédé par des résistances pull-up. Elles sont utilisées pour la détection d'événements discrets tels que décollage et la séparation.
- 3 sorties directement connectées à 3 GPIO du microcontrôleur utilisées par exemple pour transmettre le signal d'allumage du 2e étage.
- 2 entrées logiques optocouplées destinées à des liaisons vers d'autres équipement de manière sécurisés ;
- 2 sorties logiques optocouplées destinées à des liaisons vers d'autres équipement de manière sécurisés ;
- 2 liaisons UART dont une dédiée à la centrale inertielle `WT901B` et un autre pour la liaison avec l'expérience et préalablement découplé via un module `ADUM1281ARZ-RL7` ;
- 2 liaison UART half-duplex [3] servant au pilotage des servomoteurs Feetech ;
- 3 liaison PWM servant de connecteurs de secours au développement de l'architecture système global ;
- 4 connecteurs dupont verticaux femelle servant à la connexion de la carte IHF ;
- 1 jumper de configuration pour la séléction du mode de fonctionnement du séquenceur (1er étage ou 2e étage) ;
- 1 port USB type C pour l'alimentation de la carte sans batterie et pour le développement du programme logiciel embarqué.

A noter qu'un bon nombre des connecteurs ne sont pas utilisé nominalement sur le projet SP-02. Ils ont cependant été mis et gardé au cours du développement afin de guarentir une agilité face à des problématiques qui pourront ou qui auraient pu arrivé nécessitant des changements au niveau de l'architecture système global.

1.3.2.2 Alimentation électrique

Le séquenceur est alimenté par deux batteries Li-ion 18650 de 2600 mAh mis en série et fournissant une tension nominale de 7,4 V. La puissance de la batterie passe par le connecteur Molex Micro-Fit 3.0, puis par la carte IHF via les dupont vecticaux et dans un interupteur mécanique. Ce dernier permet de contrôler l'alimentation du séquenceur depuis l'extérieur de la fusée. L'alimentation retourne ensuite vers le séquenceur et passe par un régulateur de tension `TPS6217` pour fournir une tension de 3.3 V au microcontrôleur et aux autres composants de la carte. Le régulateur est capable de fournir un courant de 500 mA, ce qui est largement suffisant pour le fonctionnement de l'ensemble du séquenceur, servomoteurs mis à part.

La logique de la carte peut également êtra alimentée par le port USB. La puissance fournie passe seulement dans le régulateur de tension sans passer par l'interupteur mécanique. Cela permet de pouvoir alimenter la carte sans batterie. Cependant, les servomoteurs ne peuvent pas être alimentés par le port USB. Ce mode de fonctionnement est donc uniquement destiné à certaine partie du développement du programme logiciel embarqué.

1.3.2.3 Choix du microcontrôleur

Le STM32F072RBT6 a été sélectionné pour ses caractéristiques techniques adaptées aux exigences du projet :

- architecture ARM Cortex-M0 32 bits, offrant une puissance de calcul suffisante pour la gestion des séquences et le traitement des données inertielle ;
- faible consommation énergétique, essentielle pour les opérations prolongées en vol ;

3. La variante half-duplex de l'UART désigne une configuration où les données TX et RX sont transmit dans un seul câble au lieu de 2 dans la version classique dite "full-duplex.

— large gamme d'interfaces de communication (UART, SPI, I2C, GPIO), facilitant l'intégration avec les capteurs et actionneurs embarqués ;
— 128 kB de mémoire flash et 16 kB de RAM.

Ayant déjà travaillé avec cette famille de microcontrôleurs sur des projets antérieurs, l'équipe dispose d'une expertise pour le développement et le débogage du firmware.

1.3.2.4 Moyen de détection d'attitude

Un des objectifs que doit remplir le séquenceur, et qui le distingue des séquenceurs de fusée monoétage, est la présence d'un moyen de détection d'attitude. En effet, le séquenceur du deuxième étage doit être capable de déterminer l'attitude de la fusée à un instant donné afin de vérifier que l'allumage du moteur du deuxième étage remplit les conditions primaires de sécurité. Pour cela, le séquenceur est équipé d'une centrale inertielle `WT901B`.

Figure 1.9 – wt901b

Ce module regroupe, un accéléromètre trois axes ($\pm 16\,\mathrm{g}$), un gyromètre trois axes ($\pm 2000\,^{\circ}\,\mathrm{s}^{-1}$), un magnétomètre trois axes ($\pm 4900\,\mu\mathrm{T}$) ainsi qu'un baromètre. Sa particularité, et la raison principale de son choix, est qu'il n'expose pas uniquement des mesures brutes : un microcontrôleur interne exécute un algorithme de fusion de type filtre de Kalman et restitue directement l'attitude du module, sous forme d'angles d'Euler et de quaternion. Le constructeur annonce une précision angulaire de 0.05° sur les axes X et Y, et de 1° sur l'axe Z après calibration magnétique.

La communication avec le séquenceur s'effectue par liaison UART sur un port dédié de la carte. Le module émet spontanément ses trames, à une cadence configurable de 0.2 Hz à 200 Hz.

[METTRE PHOTO SEQUENCEUR]

1.4 Interface Homme Fusée

Dans un projet de fusée, l'interface est un élément essentiel pour permettre de facilement mettre en oeuvre les différentes fonctionnalités de la fusée une fois cette dernière assemblée. Elle doit être la plus petite possible pour diminuer les dimension du trou dans la peau de la fusée et ainsi limiter les perturbations aérodynamiques et augmenter la résistance structurelle globale. Mais elle se dpot également d'être la plus complète possible pour permettre de piloter l'ensemble des actions de la fusée.

L'Interface Homme Fusée (IHF) sur la fusée SP-02 est composée de plusieurs éléments :

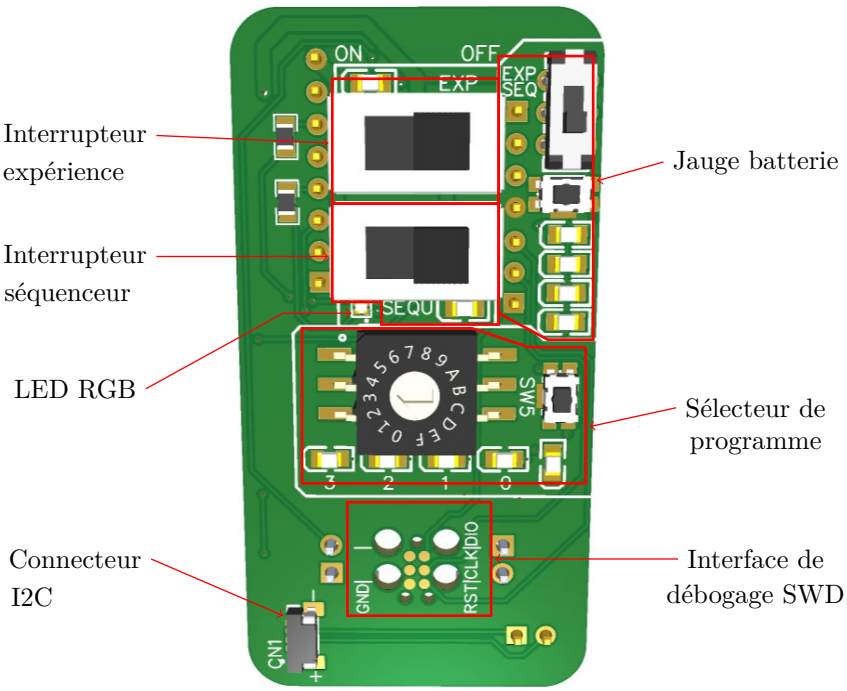


Figure 1.10 – PCB Interface Homme Fusée

— Une jauge de batterie permettant de visualiser le niveau de charge des batteries du séquenceur et de l'expérience. Un interrupteur permet de sélectionner la batterie à visualiser et un bouton permet de déclencher la mesure. 4 leds font office d'afficheur de niveau de charge ;

— Un interrupteur permettant de mettre sous tension l'expérience embarquée. Un voyant rouge permet de visualiser l'état de l'expérience (allumé ou éteinte) ;

— Un interrupteur permettant de mettre sous tension le séquenceur. Un voyant rouge permet de visualiser l'état du séquenceur (allumé ou éteint) ;

— Une LED RGB permettant de visualiser l'état du logiciel embarqué du séquenceur. Une multitude de couleurs et de clignotement peuvent alors indiquer à quel endroit dans le programme le séquenceur se trouve ;

— Un sélecteur de programme. Le sélecteur possède 16 positions. Un bouton poussoir permet de déclencher la lecture de la position du sélecteur et d'envoyer cette information au séquenceur et ainsi d'effectuer l'action correspondante. 4 leds permettent de visualiser la position du sélecteur ;

— Une interface de débogage SWD permettant de programmer le microcontrôleur du séquenceur et de déboguer le logiciel embarqué alors que la fusée est assemblée. Elle est fait de sorte à ce qu'un câble Tag Connect TC2030 puisse s'y connecter ;

— Un connecteur I2C permettant de connecter le séquenceur à un éventuel système externe. L'idée était de pouvoir connecter un module doté d'interface tactile plus simple à utiliser ainsi que d'un écran pour visualiser les informations de la fusée et permettre de rendre les opérations au sol encore plus simples et plus intuitives. Le module n'a pas pu être développé à temps pour le vol de la fusée SP-02.

[METTRE PHOTO IHF SUR SEQUENCEUR + PHOTO IHF DANS FUSEE]

1.5 Servomoteurs

Les fonctions de commande liées au déploiement des aérofreins et à l'actionnement des mécanismes du lanceur SP-02 reposent sur l'utilisation de servomoteurs. Le choix de ces actionneurs conditionne directement l'architecture d'alimentation, la précision de commande et la robustesse globale du système.

Figure 1.11 – Servomoteur STS3215

Les servomoteurs STS3215 ont été retenus comme un compromis adapté aux besoins du projet en termes de coût, de couple disponible et de capacités de contrôle. Leur couple maximal de 19,5 kg.cm offre une marge confortable vis-à-vis des efforts attendus, tout en autorisant différents modes de fonctionnement.

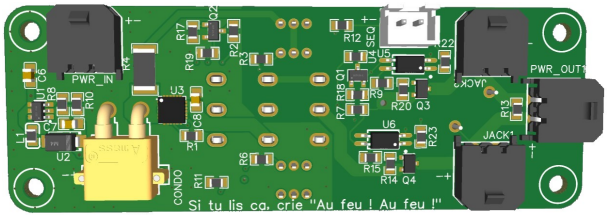
Les STS3215 intègrent une électronique de commande avancée incluant des capteurs internes de tension, de courant et de température, permettant la surveillance de leur état de fonctionnement et l'estimation indirecte du couple fourni et donc également du couple résistant. Cette fonctionnalité permet notamment de détecter les blocage. Par exemple, pour le cas des aérofreins, la détection d'un blocage lors de l'initialisation de la fusée permettrait de détecter la plage de déploiement minimal et maximal des aérofreins et donc d'étalonner le système.

La communication s'effectue via une interface numérique de type UART half-duplex basée sur des registres internes, les servomoteurs étant adressables et pouvant ainsi être chaînés sur une même ligne de communication.

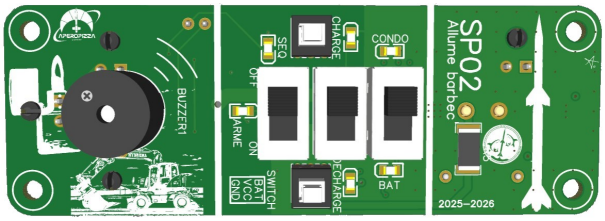
Enfin, ces servomoteurs proposent plusieurs modes de fonctionnement, notamment un mode de contrôle en position basé sur un encodeur magnétique multi-tours offrant une précision inférieure au degré, ainsi qu'un mode de contrôle en vitesse permettant un fonctionnement en rotation continue. Cette polyvalence en fait une solution particulièrement adaptée aux exigences du projet.

1.6 Ligne de mise à feu

La ligne de mise à feu est conçue pour assurer un allumage fiable et sécurisé du moteur du 2e étage de la fusée. Son objectif est d'être capable de fournir assez de puissance à l'inflamateur lorsque le séquenceur donne l'odre de la mise à feu.



(a) (principale, côté composants)



(b) (principale, côté interface)

(c) (condensateurs)

FIGURE 1.12 – Rendu 3D des cartes PCBs principale et condensateurs dy système d'allumage

1.6.1 Principe de fonctionnement

Le système repose sur une alimentation constituée d'une batterie Li-Po de faible puissance associée à un réhausseur de tension, permettant la charge d'une banque de condensateurs (déportée de la carte d'allumage principale) à travers une résistance, sur une durée courte.

Une fois le système armé, cette banque de condensateurs est connectée à deux transistors MOSFET normalement bloquants. L'ordre de mise à feu est transmis par le séquenceur sous forme d'une impulsion commandant deux optocoupleurs, lesquels pilotent l'ouverture des MOSFET. Ceux-ci deviennent alors conducteurs et autorisent le passage du courant.

Deux shunts de sécurité, réalisés sous forme de courts-circuits, peuvent être insérés afin d'assurer une protection pyrotechnique. En leur absence, un buzzer est activé et la ligne pyrotechnique reliée à l'inflammateur du moteur du second étage est mise sous tension.

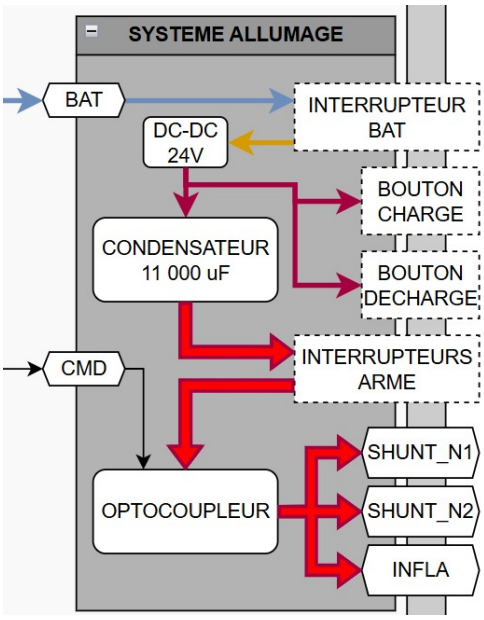


FIGURE 1.13 – Zoom sur le synoptique de la ligne de mise à feu (ref. annexe A)

La banque de condensateurs, directement connectée à cette ligne de faible impédance, est alors capable de délivrer un courant élevé, suffisant pour activer l'inflammateur et initier la combustion du moteur du deuxième étage.

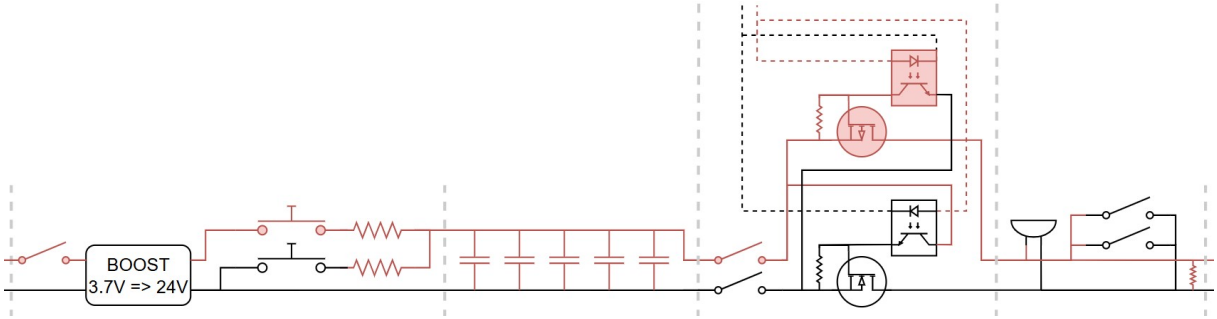


FIGURE 1.14 – Schéma de la ligne de mise à feu

Le schema ci-haut (figure 1.14) présente une autre vision de la ligne de mise à feu.

Circuit de charge/décharge des condensateurs Le circuit de charge/décharge des condensateurs est conçu pour assurer une charge et une décharge contrôlées de la banque de condensateur à l'aide de résistances évitant les courants d'appel élevés qui pourraient endommager les composants ou présenter un danger pour les opérateurs.

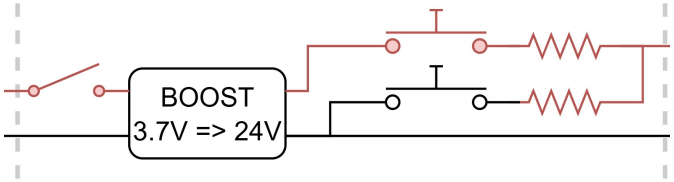


FIGURE 1.15 – Zoom sur le circuit de charge/décharge des condensateurs

Il se compose en premier lieu d'un interrupteur batterie qui permet d'alimenter ou de couper l'alimentation de la ligne de mise à feu. Lorsque l'interrupteur est fermé, une led rouge s'allume. La batterie alimente un circuit réhausseur de tension passant de 3.7V à 24V et basé sur le composants MSKSEMI-MSDB628. Cela permet d'augmenter la densité énergétique stockée dans les condensateurs. Ensuite, deux boutons poussoir autobloquant nommé "charge" et "décharge" permet connecter la banque de condensateurs soit au 24V, soit à la masse et ce au travers d'une résistance de 402 Ω. Le courant maximal de charge ou de décharge est alors de :

$$I = \frac{V}{R} = \frac{24V}{402\Omega} \approx 60mA$$

Circuit condensateurs Le circuit de condensateurs est conçu pour stocker l'énergie nécessaire à l'allumage du moteur du deuxième étage et pour la délivrer suffisamment rapidement lorsque le séquenceur donne l'ordre de mise à feu.

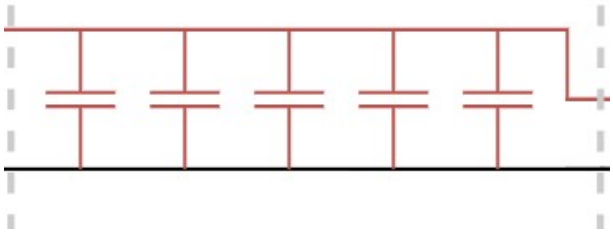


FIGURE 1.16 – Zoom sur le circuit de condensateurs

Il se compose d'une banque de 6 condensateurs électrolytiques de 4700 μF chacun, connectés en parallèle, ce qui donne une capacité totale de 28.2 mF.

Il est écrit dans le Cahier des Charges :

> (Règle) *INF1 : Pour détoner, l'inflammateur doit être alimenté par un courant de 4A pendant 30ms. Sa résistance interne (tant qu'il n'a pas détoné) est de 1Ω.*
> [1, p. 73]

La cinématique de décharge des condensateurs est donnée par la formule suivante :

$$\begin{aligned} I(t) &= \frac{V_{max}}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \\ &= \frac{24}{1} e^{-\frac{t}{1 \times 0.0282}} \\ &\approx 24 e^{-\frac{t}{0.0282}} \end{aligned}$$

Vu que la fonction est bijective, on peut également déterminer la fonction inverse qui nous donne l'instant à laquel le courant atteint une valeur donnée :

$$\begin{aligned} I &= \frac{V_{max}}{R} e^{-\frac{t(I)}{RC}} \\ \frac{RI}{V_{max}} &= e^{-\frac{t(I)}{RC}} \\ \ln\left(\frac{V_{max}}{RI}\right) &= -\frac{t(I)}{RC} \\ t(I) &= RC \ln\left(\frac{V_{max}}{RI}\right) \\ t(I) &= 0.0282 \times \ln\left(\frac{24}{I}\right) \end{aligned}$$

Cela nous permet de trouver l'instant tel que système se trouve en dessous des 4 A : $t(4) = 50.52\ ms$. Nous sommes donc bien au dessus des 30 ms requis pour l'allumage de l'inflammateur. Nous pouvons également calculer le delta de courant entre ce que le cahier des charges demande et ce que le système délivre à l'instant de 30 ms : $I(0.03) = 8.283\ A$. Nous avons donc une marge de 4.283 A à l'instant de 30 ms, ce qui est largement suffisant pour assurer un allumage fiable du moteur du deuxième étage.

On estime le temps de charge complet théorique de la banque de condensateurs à 5 fois la constante de temps, soit : $5\tau = 5 \times RC = 5 \times 402 \times 0.0282 = 5 \times 11.3364 = 56.682\ s$

Circuit isolateur Le circuit isolateur est conçu pour assurer une isolation galvanique entre la ligne de mise à feu et les autres éléments du système électronique de la fusée tout en permettant la transmission du signal de mise à feu du séquenceur au circuit d'allumage.

Il se compose tout d'abord de deux interrupteurs correspondant aux interrupteur des pyrotechniciens.

Puis, deux optocoupleurs et de deux transistors MOSFET jouent le rôle respectivement de commutateur à haut potentiel et de commutateur à bas potentiel, l'un étant sur la ligne positive et l'autre sur la ligne neutre.

Lorsque le séquenceur donne l'ordre de mise à feu, il envoie une impulsion qui active les optocoupleurs. Ceux-ci pilotent l'ouverture des MOSFET qui deviennent alors conducteurs et permettent le passage du courant de la banque de condensateurs vers l'inflammateur du moteur du deuxième étage.

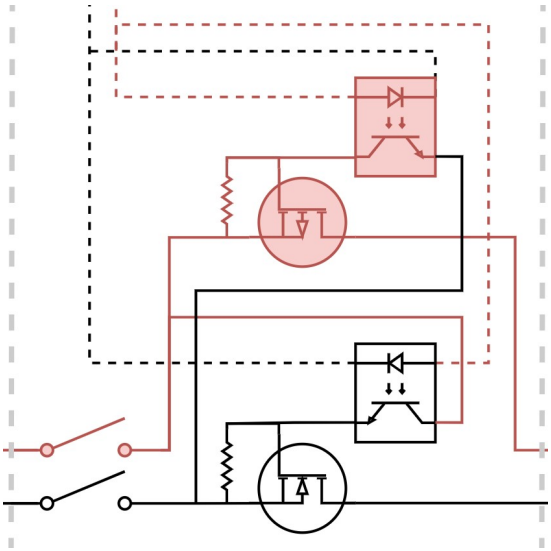


Figure 1.17 – Zoom sur le circuit isolateur

Circuit final La fin du circuit comporte un buzzer, deux shunts et une résistance à relativement haute impédence.

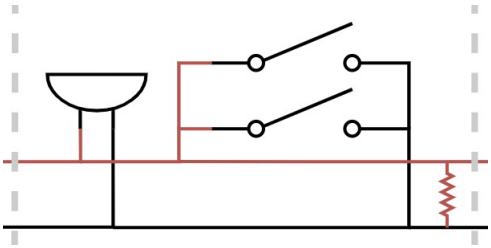


Figure 1.18 – Zoom sur le circuit final

Le buzzer joue le rôle d'indicateur sonore indiquant que la ligne pyrotechnique est sous tension.

Les deux shunts sont des sécurités supplémentaires faisant court-circuit au cas où un courant est présent alors que les conditions d'allumage ne sont pas réuni. En pratique, qu'un seul des deux shunts sera utilisé et sera attaché à la rampe de la fusée rendat ainsi les opérations aux sols plus sûr.

La résistance permet au système de se déchargé une fois l'inflammateur utilisé.

1.6.2 Interface

L'interface du système d'allumage se compose de 3 interrupteurs, de 2 boutons autobloquant et de 6 LEDs.

Parmi les 3 interrupteurs, le premier (le plus haut) est nommé interrupteur `BAT`. Il connecte ou déconnecte la batterie au système. Lorsque la batterie est connecté, la led nommé `BAT` s'illumine en rouge.

Les deux autres inerrupteurs correspondent aux interrupteurs pyrotechique. Ils connectent (respectivement de haut en bas) le haut potentielle (`VCC`) et le bas potentiel (`GND`) des condensateurs aux MOSFET de blocage. La led `ARME` indique le niveau de tension entre les deux MOSFET entre 0 et 24 V.

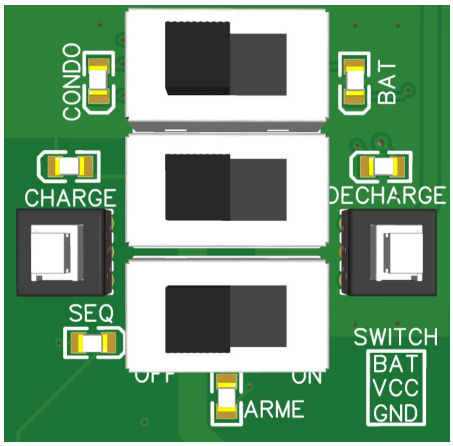


Figure 1.19 – Zoom sur l'interface de la carte principale du système d'allumage

Le bouton de gauche (nommé `CHARGE`) permet de charger les condensateurs tandi que le bouton de droite (nommé `DECHARGE`) permet de les décharger. Pour les deux boutons, lorsque l'un d'entre eux est enfoncé, une led située juste au dessus de lui s'illumine en bleu indiquant l'état courant de charge ou de décharge. A noté que le fait de charger et décharger les condensateurs en même temps a pour effet potentiel de placer les condensateurs dans un état indéterminé mais non dangereux.

La led nommée `CONDO` indique l'état de charge des condensateurs entre 0 et 24 V.

La led nommée `SEQ` indique l'état du signal électrique venant du séquenceur et commendant l'état ouvert ou fermé des MOSFET.

A noté que toutes les led sont directement allimenté par la batterie et non pas les condensateurs, permettant ainsi de maximiser l'énergie présent dans la banque de condensateur avant libération d'énergie dans l'inflamateur.

1.6.3 Séquence de vol

Voici la chronologie des événements attendu concernant la ligne de mise à feu :

1. Vérifier la présence du shunt de sécurité et de son bon état.
2. Vérifier l'état de tous les interrupteurs : `OFF`.
3. Vérifier l'état de toutes les LEDs : éteint.
4. Changer l'état de l'interrupteur `BAT` à `ON`.
5. Vérifier que la led `BAT` s'allume en rouge et que les autres LEDs restent éteintes.
6. Si la les `DECHARGE` s'allume en bleu, changer l'état du bouton `DECHARGE` à `OFF`.

A cette étape, le système est prêt à être charger en énergie.

7. Changer l'état du bouton `CHARGE` à `ON`.
8. Vérifier que la led `CHARGE` s'allume en bleu.
9. Attendre 1 minute pour que les condensateurs soient complètement chargé.
10. Vérifier que la led `CONDO` est allumée en rouge.
11. Vérifier que la led `SEQ` est éteinte et que le buzzer est éteint.

A cette étape, le système est prêt à être armé.

12. Changer l'état de l'interrupteur `VCC` à `ON`.
13. Changer l'état de l'interrupteur `GND` à `ON`.
14. Vérifier que la led `ARME` s'allume en vert.
15. Vérifier que la led `CHARGE` est toujours allumée en bleu.

A cette étape, le système est armé et prêt à être mis à feu. C'est l'état final du système avant le lancement de la fusée.

Lorsque le séquenceur donne l'ordre de mise à feu, la led `SEQ` s'allume en rouge. Le buzzer se met également en route tant qu'il y a du courant dans les condensateurs et que les shunts de sécurité ne sont pas en place.

1.7 Expérience Apex

1.7.1 Exigences et besoins

L'objectif du système expérimental de la fusée est de déterminer la trajectoire de chaque étage en temps réel. De cet objectif découlent trois besoins principaux.

- **Disposer d'un système intégrable dans les deux étages**, il doit donc être compact, léger et consommer peu d'énergie.
- **Mesurer un nombre suffisant de paramètres**, afin de réduire l'incertitude sur l'estimation de la trajectoire. Les paramètres retenus sont les suivants :
  - l'accélération linéaire ;
  - la vitesse angulaire ;
  - le champ magnétique ;
  - la pression statique ;
  - la température ;
  - les données GNSS.

  Pour le deuxième étage, la pression totale au niveau de la pointe de la coiffe est également mesurée. L'ensemble de ces mesures, associé à d'autre variables interne, constitue un enregistrement de 127 B [4] produit à une cadence de 100 Hz, soit un flux de 12.7 kB s^{-1} [4] (101.6 kbit/s).

- **Disposer de points d'observabilité suffisants**, afin de pouvoir recalculer la trajectoire après le vol et la comparer à celle déterminée en vol. L'objectif est de récupérer l'intégralité du flux de données du calculateur, à la fréquence de l'algorithme de calcul. Pour chaque étage, deux cas se présentent :
  - l'étage est retrouvé intact : un moyen de sauvegarde numérique embarquée pouvant contenir l'intégralité du flux sur la durée du vol, soit moins de 4 MB [4] pour un vol de cinq minutes, doit être prévu ;
  - l'étage n'est pas retrouvé ou dans un état ne permettant pas la récupération des données enregistrées : la seule manière de disposer malgré tout du flux est de l'avoir émis pendant le vol, ce qui impose un moyen de télémesure à bord et une station de réception au sol.

  Le besoin d'observabilité est donc avant tout un besoin post-vol. La télémesure n'est requise que comme garantie contre la perte d'un étage ; mais dès lors que ce flux est émis en vol, il devient possible de suivre la trajectoire en direct depuis le sol. Cela constitue une opportunité que le système expérimental exploite.

Cependant, la fusée n'est pas un système passif : le premier étage déploie des aérofreins puis commande la séparation avec le deuxième étage, ce dernier peut ou non déclencher son propulseur, et chaque étage déploie son parachute. Bien que le déroulement de la mission soit assuré par les séquenceurs, le système expérimental doit connaître la chronologie de ces actions, puisqu'elles influent directement sur la trajectoire des étages.

Par ailleurs, la détermination de l'attitude de la fusée par le séquenceur à partir du capteur `wt901b` ne relève pas de l'expérience : elle est nécessaire au déroulement du vol. Elle constitue néanmoins une première pour l'équipe, tant par la méthode employée que par l'utilisation de ce type de capteur, ce qui justifie de la valider expérimentalement.

Ces deux constats se traduisent par deux besoins supplémentaires :

- connaître les actions exécutées par les séquenceurs, ainsi que leur datation ;
- être capable de valider la technique de détermination de l'attitude mise en œuvre par les séquenceurs.

4. B pour byte(s) ou octet(s) en français

1.7.2 Module Apex et limitations

En prenant en compte l'ensemble de ces besoins, il a été déterminé que le module APEX, déjà existant et fonctionnel en deux exemplaires, constituait une base solide pour le système expérimental. Il a donc été décidé de l'utiliser comme module expérimental principale, avec quelques améliorations. En effet, le module pocède :

- Un microcontroleur `STM32F411RETx` ;
- Une mémoire flash de 64 MB ;
- Trois accéléromètres ayant des plages de mesures différentes ;
- Un gyromètre ;
- Un magnétomètre ;
- Un baromètre ;
- Un capteur de température ;
- Un récepteur GNSS ;
- Un module de télémesure `rfm95w` .

La référence suivante [2] donne accès à la documentation complète du module APEX.
Le module possède également un connecteur de 20 pins permettant de fortement d'étendre ses fonctionnalités. En effet, seul, la carte ne remplie pas tous les besoins exprimés précédemment.

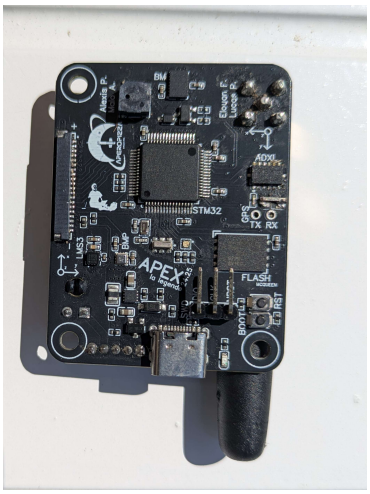


Figure 1.20 – Vue de face du module APEX.

L'un des retours d'expérience des équipes ayant précédemment travaillés sur les modules Unknown et Apex est que le choix du système de télémesure est crucial et nécessite de faire des compromis. L'un des protocoles de télémesure les plus répandus est le LORA, qui permet d'émettre un flux de données sur de longues distance et à faible consommation. Cependant, le débit de ce protocole est limité à une dizaines de kilobits par seconde, ce qui est bien en deçà du flux de données produit par le module expérimental.

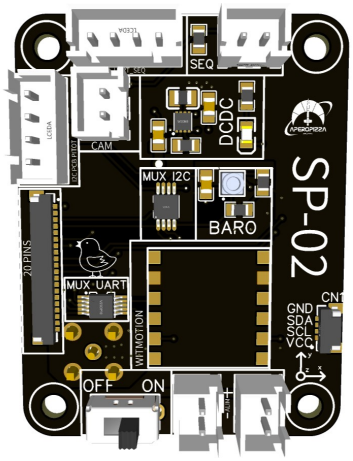
Un autre protocole de télémesure grandement utilisé dans le domaine de l'astromodélisme est le FSK. Il permet d'émettre un flux de données à des débits bien plus élevés que le LORA, mais à des distances bien inférieures pour une même puissance d'émission.

Le choix d'utiliser les deux protocoles de télémesures a donc été fait :

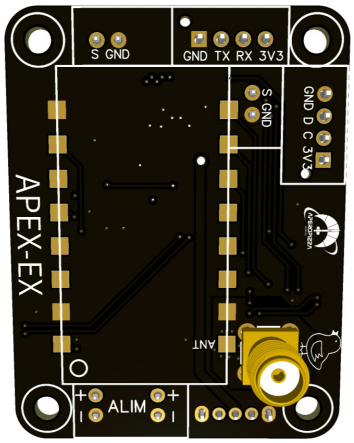
- Le protocole FSK est utilisé pour émettre le flux de données du module expérimental, afin de suivre la trajectoire en direct depuis le sol ;
- Le protocole LORA est utilisé pour émettre un flux de données plus léger, contenant les informations essentielles de la fusée comme par exemple la position GPS.

1.7.3 Module ApexEx

Afin de couvrir l'ensemble des besoins exprimés, il a été décidé de concevoir une carte supplémentaire, nommée ApexEx (Apex Extension). Cette carte sera connectée au module APEX via le connecteur de 20 pins.



(a) Vue de face du module ApexEx.



(b) Vue de dos du module ApexEx.

FIGURE 1.21 – Vue du module ApexEx.

Ce nouveau module ne possède pas de microcontroleur, la logique de contrôle étant assurée par le module APEX. Il permet d'ajouter les fonctionnalités suivantes au système expérimental :

- Un baromètre `ILP28SQSW` ;
- Un module `wt901b` ;
- Un transceiver radio `LORA1276F30` ;
- Un ensemble de deux connecteurs reliant le module d'expérience de l'étage courant au séquenceur s'y trouvant ;
- Un connecteur branché à un deuxième baromètre `ILP28SQSW` placé sur la carte Pitot se trouvant au niveau de la pointe de la coiffe du deuxième étage ;
- Un connecteur relié au système de caméra embarqué ;
- Un module de régulation de tension `TPS62172`, le module APEX ne fournissant pas de puissance via le connecteur de 20 pins.

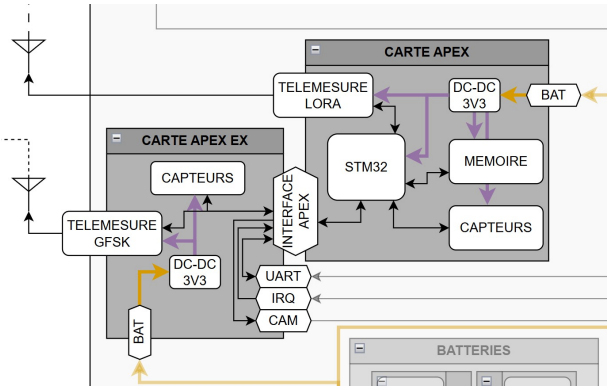


FIGURE 1.22 – Zoom sur le synoptique du module expérimental (ref. annexe A)

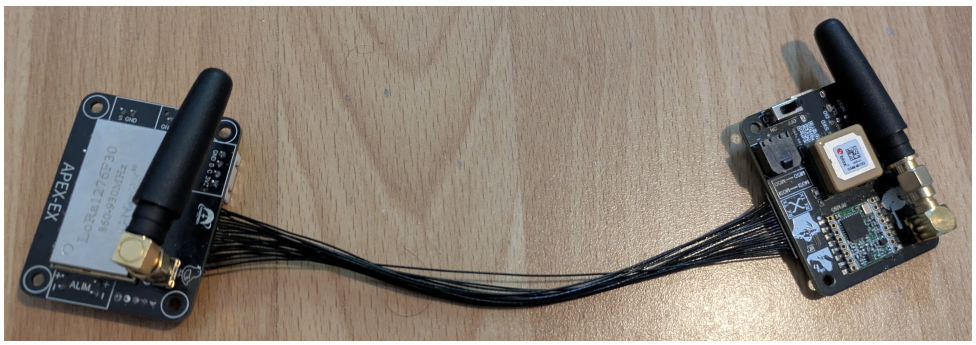
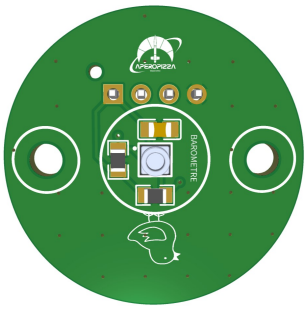


FIGURE 1.23 – Apex et ApexEx branché par le connecteur 20 pins.

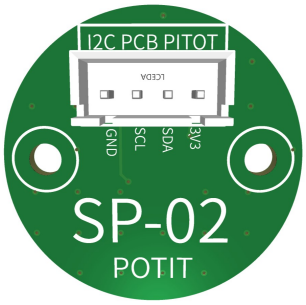
1.7.4 Système expérimental Apex

Le système expérimental Apex dans le cadre du projet SP-02 est donc constitué du module APEX, de la carte ApexEx et de la carte Pitot.

1.7.4.1 Mesure de la vitesse aéronautique



(a) Vue de face



(b) Vue de dos

FIGURE 1.24 – Module Pitot.

La technique de mesure de la vitesse aéronautique utilisée par le module expérimental est la technique dite de la sonde Pitot. Elle consiste à mesurer la pression totale au niveau de la pointe de la coiffe du deuxième étage, ainsi que la pression statique à l'intérieur du fuselage de la fusée. La différence entre ces deux pressions permet de calculer la vitesse de l'air par rapport à la fusée.

$$v_{air} = \sqrt{\frac{2 \times (P_t - P_s)}{\rho}}$$

où v_{air} est la vitesse de l'air par rapport à la fusée, P_t est la pression totale et P_s est la pression statique. La masse volumique de l'air ρ est estimé à partir de l'estimation de l'altitude de la fusée, elle-même calculée à partir de la pression statique.

Sachant que la vitesse maximale de la fusée est estimée à $180\,\mathrm{m\,s^{-1}}$, la pression totale maximale peut être rapidement majorée à :

$$\begin{aligned} P_t &= \frac{1}{2}\rho v^2 + P_s \\ &= \frac{1}{2} \times 1.225 \times (180)^2 + P_s \\ &= 19845 + 101325 \\ &= 121170 \text{ Pa} \\ &= 1211.7 \text{ hPa} \end{aligned}$$

Le baromètre `ILP28SQSW` est capable de mesurer des pressions allant de 260 hPa à 1260 hPa dans un premier mode de fonctionnement, et de 260 hPa à 4060 hPa dans un second mode moins sensible. Il est donc capable de mesurer la pression totale dans la plage de fonctionnement de la fusée.

En considérant la plage de fonctionnement du baromètre, l'altitude maximale qui peut être mesurée par le module expérimental est de l'ordre de 10 km et la vitesse maximale mesurable est de l'ordre de $705\,\mathrm{m\,s^{-1}}$.

[METTRE PHOTO ASSEMBLAGE POINTE PLUS PITOT]

1.7.4.2 Chaines de télémesures

Comme établi précédemment, la chaîne de télémesure doit permettre de récupérer le flux de données de vol même en cas de perte d'un étage, et rend possible par la même occasion un suivi de la trajectoire en direct depuis le sol. Aucune modulation ne satisfait cependant simultanément les exigences contradictoires de débit et de robustesse : l'architecture retenue en associe donc deux, le LORA, robuste mais lent, pour les données essentielles à la reconstruction de la trajectoire, et le FSK, rapide mais plus sensible au bruit, pour le reste du flux.

Chaque étage embarque un module par modulation, soit quatre transceivers, tous construits autour de la même puce Semtech `SX1276` qui supporte nativement les deux. Le plan de fréquences attribue une fréquence par modulation et non par module : 868 MHz pour les deux liens LORA, 869.5 MHz pour les deux liens FSK, cette sous-bande autorisant une puissance d'émission de 500 mW. La station sol se réduit ainsi à deux récepteurs, mais deux émetteurs partagent chaque canal : l'accès est organisé par Time Division Multiplexing (TDM).

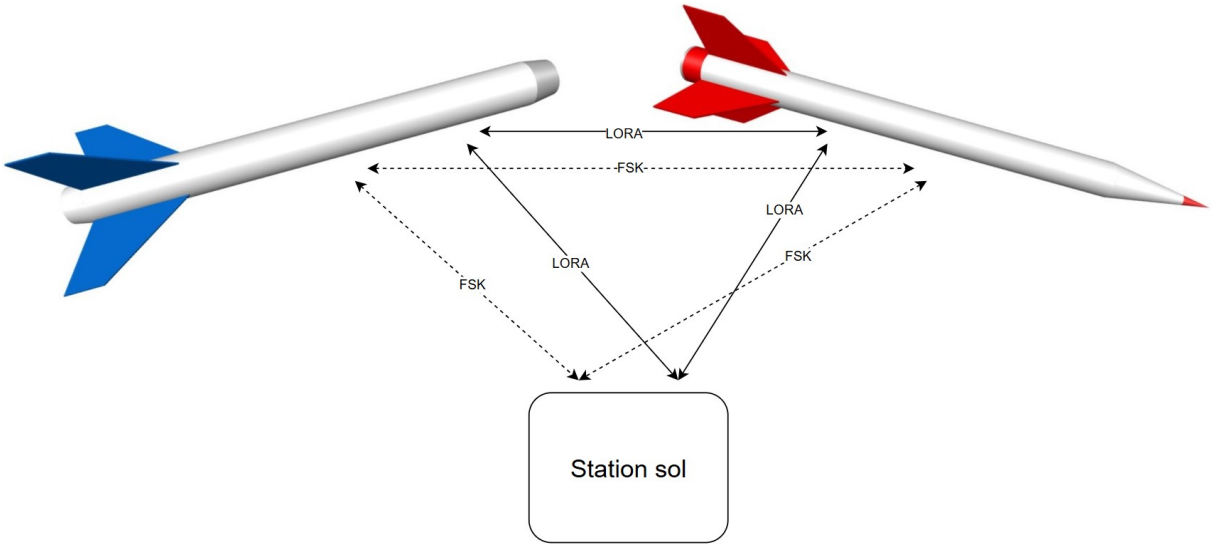


FIGURE 1.25 – Vue d'ensemble de la chaîne de télémesure

Protocole LORA Le Long Range (LORA) est une modulation propriétaire de Semtech reposant sur un étalement de spectre à variation linéaire de fréquence (*Chirp Spread Spectrum*) : chaque symbole est codé par un *chirp* balayant toute la bande allouée. Le gain de traitement qui en résulte permet de démoduler un signal dont la puissance est inférieure au niveau de bruit.

Le débit, fixé par le facteur d'étalement (SF7 à SF12), la bande passante et le taux de codage, reste en revanche limité à 37.5 kbit/s au mieux sur le `SX1276`, soit un ordre de grandeur en dessous du flux produit par l'expérience. Le LORA ne porte donc qu'un sous-ensemble réduit des données, à cadence réduite, mais constitue le lien le plus fiable de la chaîne.

Protocole FSK Le Frequency-Shift Keying (FSK) code l'information par le décalage de la porteuse autour de sa valeur nominale. Sans étalement de spectre, il ne bénéficie d'aucun gain de traitement, mais accepte des débits bien supérieurs : jusqu'à 300 kbit/s sur le `SX1276`, largement de quoi couvrir les 101.6 kbit/s produits par l'expérience. La sensibilité, d'environ −118 dBm à bas débit, se dégrade toutefois à mesure que celui-ci augmente.

La chaîne met en œuvre la variante Gaussian Frequency-Shift Keying (GFSK), dans laquelle le signal modulant est mis en forme par un filtre gaussien. Ce filtrage supprime les discontinuités de phase responsables de l'étalement spectral à débit et complexité de démodulation inchangés.

Module SX1276X, RFM95W et LORA1276F30
Les quatre transceivers reposent sur la puce Semtech `SX1276`, transceiver sub-gigahertz couvrant la bande 137 MHz à 1020 MHz, piloté par bus SPI et supportant les modulations LORA, FSK, GFSK et OOK. Deux modules du commerce fondés sur cette puce ont été retenus : le `RFM95W` de HopeRF, qui se limite au front-end radio du composant, et le `LoRa1276F30` de NiceRF, qui y ajoute un amplificateur de puissance en émission et un amplificateur faible bruit en réception.

	`RFM95W`	`LoRa1276F30`
Modulation	LORA	GFSK
Fréquence	868 MHz	869.5 MHz
Puissance maximale	20 dBm	27 dBm
Puissance retenue	25 mW	500 mW
Sensibilité	−148 dBm	−139 dBm

Table 2 – Caractéristiques des modules de télémesure

1.7.4.3 Communication avec le séquenceur

La liaison entre le séquenceur et le module expérimental doit permettre au premier d'informer le système APEX de son état. Les algorithmes de calcul de trajectoire peuvent ainsi sélectionner les modèles et les paramètres de vol adaptés à la phase en cours. Elle permet en outre, après le vol, de reconstruire la chronologie des actions du séquenceur, de vérifier qu'il a bien rempli sa mission et de mesurer le décalage temporel entre chacune de ses commandes et la réponse effective de la fusée.

En raison d'une contrainte d'occupation du bus UART (détaillée en section 1.7.4.5), le système APEX doit se placer dans une configuration particulière pour que son microcontrôleur soit effectivement relié au séquenceur. Deux approches ont été envisagées.

— **Interrogation périodique.** APEX établit la connexion à intervalle régulier et interroge le séquenceur, qui lui transmet en réponse les actions effectuées depuis la requête précédente. Simple à mettre en œuvre, cette approche ne permet pas de suivre les changements d'état du séquenceur en temps réel. Elle impose surtout de fixer une cadence d'interrogation : suffisamment élevée pour ne pas perdre d'information, mais suffisamment faible pour ne pas saturer le bus UART. Le séquenceur doit par ailleurs conserver en mémoire les actions accumulées entre deux requêtes. Cette mémoire tampon appartient ici au fonctionnement nominal : sa taille, configurée dans le séquenceur, doit être dimensionnée en fonction de la cadence d'interrogation, elle-même configurée dans APEX. Un tel couplage entre deux paramètres appartenant à deux sous-systèmes distincts est fragile. Tout ajustement de la cadence impose de revalider le dimensionnement du tampon, et un sous-dimensionnement se traduit directement par une perte d'événements.

— **Notification par GPIO.** À chaque action, le séquenceur signale l'événement à APEX en modifiant l'état d'une broche GPIO dédiée. APEX détecte cette transition, établit la connexion et interroge le séquenceur pour récupérer les actions concernées. Plus complexe à mettre en œuvre, cette approche suit les changements d'état en temps réel et supprime le choix d'une cadence d'interrogation. Le séquenceur maintient également dans cette approche une liste des actions en mémoire, mais celle-ci ne relève plus du fonctionnement nominal : elle n'est sollicitée qu'en cas de défaillance ponctuelle, matérielle ou logicielle, empêchant APEX de répondre à une notification. Cette liste est vidée à chaque échange abouti et son dimensionnement n'est plus lié à un paramètre extérieur au séquenceur.

La seconde approche a été retenue. Outre le suivi en temps réel, elle supprime le couplage entre la cadence d'interrogation et le dimensionnement du tampon plutôt que de le déplacer, et offre un comportement dégradé plus sûr : le tampon n'intervenant qu'en cas de défaillance, une anomalie ponctuelle retarde la remontée des événements sans les perdre.

Cette connexion se matérialise par deux connecteurs :

— `UART_SEQ_EXP` : un connecteur à 4 broches (3V3, RX, TX, GND) branché côté séquenceur sur le connecteur `UART` (voir figure 1.8) et côté APEX sur le connecteur `UART` du module ApexEx (voir figure 1.22).

— `IRQ_SEQ_EXP` : un connecteur à 2 broches (IRQ, GND) branché côté séquenceur sur le connecteur `OUT_OPTO_N1` (voir figure 1.8) et côté APEX sur le connecteur `IRQ` du module ApexEx (voir figure 1.22).

1.7.4.4 Interface avec le système de caméra embarqué

L'interface entre APEX et le système de caméra embarqué se réduit à un connecteur à deux points, portant une ligne d'interruption et la masse. Le rôle d'APEX se limite à émettre un stimulus sur cette ligne à un instant donné, soit sur réception d'un ordre transmis par la chaîne de télémesure, soit de manière autonome. Ce stimulus est interprété en aval par le système de caméra, qui en déduit l'activation ou l'extinction des caméras.

Le recours à un ordre transmis depuis le sol appelle une précision : le projet interdit en principe toute liaison de télémesure montante. Cette commande ne fait pas exception à la règle sur le fond, car elle n'est ni émise ni traitée en vol. Elle n'intervient qu'une fois la fusée au sol et l'ensemble des opérations pyrotechniques achevé, si bien qu'elle ne peut influer ni sur le déroulement du vol ni sur la sécurité des opérations.

1.7.4.5 Encombrement des bus de communications

La liaison entre les cartes Apex et ApexEx transite par un unique connecteur vingt points, dont le nombre de lignes limité a imposé des arbitrages sur deux bus de communication.

UART Le premier concerne l'UART. Le connecteur ne met à disposition qu'une seule liaison, alors que deux interfaces la requièrent côté ApexEx : la centrale inertielle `WT901B` et la connexion avec le séquenceur. Un multiplexeur analogique `TMUX1136DGSR` a donc été inséré sur ce bus. Ce composant regroupe deux commutateurs 2 :1 bidirectionnels, dont les entrées de sélection sont réunies sur une même broche GPIO du microcontrôleur : les lignes TX et RX basculent ainsi simultanément vers l'une ou l'autre des deux interfaces, qui deviennent de ce fait mutuellement exclusives. À un instant donné, le microcontrôleur ne peut dialoguer qu'avec un seul des deux périphériques.

I2C Le second concerne l'I2C. Les baromètres retenus ne proposent qu'un jeu d'adresses restreint, insuffisant pour distinguer sur un même bus les deux exemplaires présents sur ApexEx et celui embarqué sur Apex. Un multiplexeur `PCA9540BDP` a donc été ajouté : ce composant répartit le bus amont sur deux segments aval dont un seul est actif à la fois, ce qui permet à des périphériques de même adresse de coexister. Contrairement au précédent, il ne requiert aucune ligne de commande dédiée puisqu'il est lui-même adressé en I2C, la voie active étant sélectionnée par écriture dans son registre de contrôle. Sa mise sous tension le laisse par ailleurs dans un état où aucune voie n'est sélectionnée, ce qui garantit l'absence de conflit d'adresse tant que le logiciel n'a pas explicitement configuré le bus.

1.8 Caméra embarquée

1.9 Alimentations et masses électriques

Les systèmes de séquenceurs, d'allumage de l'inflammateur et de l'expérience sont fortement isolés les uns des autres, notamment au niveau de leurs alimentations électriques. Chaque système dispose en effet de son propre circuit d'alimentation, de ses propres batteries et donc de sa propre masse électrique. Cette séparation assure une meilleure fiabilité et une meilleure sécurité de l'ensemble (une défaillance ou un court-circuit dans un système n'affecte pas les autres) et permet d'adapter la capacité des batteries et le dimensionnement de chaque circuit aux besoins réels du système qu'il alimente.

Les batteries utilisées sont des accumulateurs Li-Ion de 3.7 V et 2.6 A h au format 18650, comme celui présenté à la figure 1.26. Ce choix repose sur leur densité énergétique, leur fiabilité et la présence d'un circuit de protection intégré contre les surcharges, les décharges profondes et les courts-circuits, indispensable à la sécurité des systèmes électroniques embarqués. Au total, 10 de ces batteries sont utilisées, réparties entre chaque système.

FIGURE 1.26 – Batterie Li-Ion 18650-26H

1.9.1 Architecture d'alimentation électrique

La figure 1.27 illustre l'architecture d'alimentation électrique des différents systèmes et permet de suivre le cheminement de l'énergie depuis les batteries jusqu'aux composants électroniques.

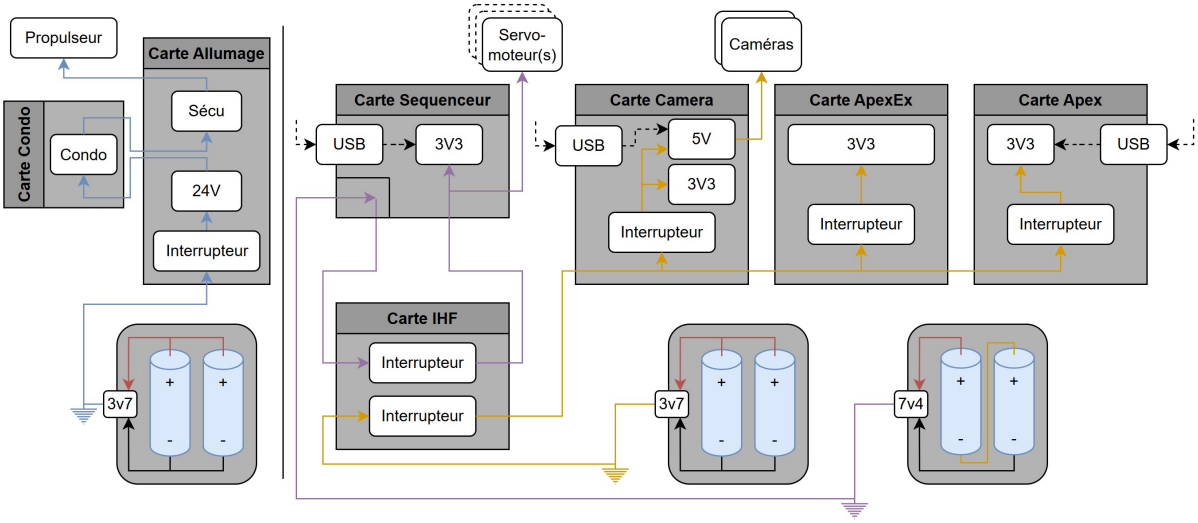


FIGURE 1.27 – Schéma de l'alimentation électrique des différents systèmes embarqués

1.9.1.1 Séquenceur

Le circuit d'alimentation du séquenceur est représenté en violet sur la figure 1.27. Il est alimenté par un bloc `1P2S` (deux batteries en série) fournissant une capacité de 2.6 A h sous une tension nominale de 7.4 V. Comme expliqué en sous-section 1.3.2.2, ce bloc est d'abord connecté au séquenceur, qui redirige la puissance vers l'interrupteur de la carte IHF avant qu'elle ne revienne sur la carte. Elle y est alors répartie entre les servomoteurs, alimentés directement sous 6.0 V à 8.0 V, et un régulateur 3.3 V qui alimente l'ensemble des composants logiques.

Un port USB type C permet en outre d'alimenter la partie logique de la carte sans batterie, notamment pour le développement du logiciel embarqué. Les servomoteurs ne pouvant être alimentés par ce port, la batterie et la carte IHF doivent rester connectées au séquenceur pour toute intervention les impliquant.

1.9.1.2 Expérience

Le circuit d'alimentation de l'expérience est représenté en orange sur la figure 1.27. Il est alimenté par un bloc `2P1S` (deux batteries en parallèle) fournissant une capacité de 5.2 A h sous une tension nominale de 3.7 V. La puissance transite d'abord par l'interrupteur dédié de la carte IHF, accessible depuis l'extérieur de la fusée, puis alimente un bus commun aux trois cartes du système : Apex, ApexEx et Camera.

Chacune de ces cartes dispose de son propre interrupteur local, en aval de celui de l'IHF. Cette double coupure permet d'isoler individuellement une carte lors des phases d'intégration et d'essais, sans interrompre l'alimentation des autres. La distribution du bus est réalisée en guirlande (*daisy chain*) : plutôt que de partir d'un point de distribution central, le bus entre sur une carte, y est dérivé vers l'interrupteur local, puis ressort vers la carte suivante. En aval, chaque carte régule la tension du bus selon ses besoins : les cartes Apex et ApexEx produisent une unique tension de 3.3 V destinée à leurs composants logiques, tandis que la carte Camera génère en plus une tension de 5 V alimentant les caméras.

Comme pour le séquenceur, les cartes Apex et Camera disposent d'un port USB type C permettant de les alimenter sans batterie pendant le développement. La carte ApexEx en est dépourvue : ne comportant pas de microcontrôleur, elle ne peut fonctionner indépendamment de la carte Apex et n'a donc pas d'usage en alimentation isolée. Cependant, il est nécessaire d'utiliser la batterie pour alimenter la carte ApexEx. Cela implique alors que la carte Apex soit également alimentée par batterie pour que ces dernières puissent partager une masse commune.

1.9.1.3 Ligne de mise à feu

Le circuit de mise à feu est représenté en bleu sur la figure 1.27. Contrairement aux deux circuits précédents, présents sur les deux étages, celui-ci n'équipe que le second : lui seul embarque un propulseur à allumer en vol. Il dispose de sa propre batterie et de sa propre masse, et constitue le domaine le plus fortement isolé de l'ensemble.

L'énergie provient d'un bloc `2P1S` dédié, de 5.2 A h sous 3.7 V. Cette capacité est très largement supérieure au besoin réel du circuit : la charge des condensateurs pouvant s'effectuer lentement, une batterie de capacité bien moindre à tension identique aurait suffi. Ce surdimensionnement est délibéré. Une architecture alternative a en effet été envisagée au cours du développement, dans laquelle l'inflammateur est alimenté directement par la batterie, sans étage capacitif intermédiaire. Nettement plus simple, cette solution exige en revanche une capacité de décharge instantanée élevée, donc une batterie de capacité supérieure. La conserver permettait ainsi de basculer vers cette architecture de secours si le circuit à condensateurs ne s'était pas révélé suffisamment fiable en fin de développement.

1.9.2 Masses électriques

L'isolation des alimentations décrite précédemment se traduit directement au niveau des masses : chaque circuit possède sa propre référence de potentiel, sans liaison avec les autres. La seule exception concerne les deux séquenceurs, qui partagent une masse commune lorsque les étages sont assemblés.

Il en résulte quatre plans de masse distincts sur la fusée assemblée. Celui :

- des deux séquenceurs ;
- de l'expérience du premier étage ;
- de l'expérience du second étage ;
- de la ligne de mise à feu.

La séparation inter-étage rompt la liaison entre les deux séquenceurs, qui retrouvent alors chacun une masse indépendante. Le premier étage compte dès lors deux plans de masse (séquenceur et expérience) et le second, trois, la ligne de mise à feu s'ajoutant aux deux précédents.

Le CDC Fusex bi-étage fait par ailleurs référence à un plan de masse mécanique, auquel les masses électriques doivent être rapportées. Le projet SP-02 n'en dispose pas : la fusée ne comporte ni treillis porteur ni structure conductrice, sa peau étant réalisée en fibre de verre. Aucune référence de potentiel n'est donc offerte par la structure, et l'ensemble des masses électriques reste flottant par rapport à celle-ci.

Table des figures

1.1 Schéma simplifié du système électronique général de la fusée SP-02 4
1.2 Vue d'ensemble des types de cartes électroniques embarquées à bord de la fusée SP-02 . . 6
1.3 Système de détection du décollage et de la séparation inter-étage 7
1.4 Schéma de la connexion inter-étage 8
1.5 PCB "connecteur séparation" du premier étage 8
1.6 PCB routage et connecteur de bord de PCB 8
1.7 Rendu 3D de la carte séquenceur 10
1.8 Zoom sur le séquenceur et interface 10
1.9 wt901b 12
1.10 PCB Interface Homme Fusée 13
1.11 Servomoteur STS3215 14
1.12 Rendu 3D des cartes PCBs principale et condensateurs dy système d'allumage 15
1.13 Zoom sur le synoptique de la ligne de mise à feu (ref. annexe A) 15
1.14 Schéma de la ligne de mise à feu 16
1.15 Zoom sur le circuit de charge/décharge des condensateurs 16
1.16 Zoom sur le circuit de condensateurs 16
1.17 Zoom sur le circuit isolateur 18
1.18 Zoom sur le circuit final 18
1.19 Zoom sur l'interface de la carte principale du système d'allumage 18
1.20 Vue de face du module APEX. 21
1.21 Vue du module ApexEx. 22
1.22 Zoom sur le synoptique du module expérimental (ref. annexe A) 22
1.23 Apex et ApexEx branché par le connecteur 20 pins. 22
1.24 Module Pitot. 23
1.25 Vue d'ensemble de la chaîne de télémesure 24
1.26 Batterie Li-Ion 18650-26H 28
1.27 Schéma de l'alimentation électrique des différents systèmes embarqués 28

Liste des tableaux

1 Présentation de l'ensemble des cartes électroniques 6
2 Caractéristiques des modules de télémesure 25

Références

[1] Planète Sciences et le CNES, "Cahier des charges des fusées expérimentales bi-étages." https://www.planete-sciences.org/espace/scae/doc/cdc_fusex_bietage, 2017.

[2] Malo Amaranti and Alexis Paillard, "Rapport de projet d'APEX." https://www.aeroipsa.com/apex, 2025.

Glossaire

A

APEX Système de mesure embarqué développé par l'association AéroIPSA pour la collecte, l'enregistrement et la télémesure des données d'avionique durant le vol de fusée expérimentale. ([2]). 21, 22, 23, 25, 26, 30

C

C'Space Campagne nationale de lancements de fusées expérimentales organisée par le CNES et l'association Planète Sciences. Elle est exculsivement réservée aux étudiants des écoles d'ingénieurs et universités françaises. Cette campagne se déroule chaque année dans le camp de Ger à Tarbes dans les Hautes-Pyrénées au début du mois de juillet.. 32

Centre National d'Études Spatiales Agence spatiale française, responsable des programmes spatiaux civils en France.. 32

G

Global Navigation Satellite System Système mondial de navigation par satellite : ensemble de constellations de satellites fournissant des données GPS pour la localisation et la synchronisation temporelle à l'échelle mondiale. Les principaux systèmes GNSS incluent le GPS (États-Unis), Galileo (Union Européenne), GLONASS (Russie) et BeiDou (Chine).. 32

Global Positioning System Système de positionnement global développé par les États-Unis, utilisant une constellation de satellites pour fournir des informations de localisation et de temps précises à des récepteurs GPS partout sur Terre. Le terme GPS est souvent utilisé de manière générique pour désigner le type de données de positionnement fournies par les systèmes GNSS.. 32

L

Long Range Technologie de communication sans fil basse consommation et longue portée, utilisée pour la transmission de données sur de grandes distances avec une faible consommation d'énergie, souvent employée dans les applications de l'Internet des Objets (Internet of Things) (IoT).. 24, 33

P

Planète Sciences Association française de promotion des sciences et des techniques auprès des jeunes, organisatrice de la campagne C'Space en collaboration avec le CNES.. 31, 32

Acronymes

C

CDC Cahier des Charges. 10, 17, 29

CNES Centre National d'Études Spatiales. 31, 32

F

FSK Frequency-Shift Keying. 21, 24, 25

G

GFSK Gaussian Frequency-Shift Keying. 24, 25

GNSS Global Navigation Satellite System. 21, 32

GPIO General Purpose Input/Output. 11, 12, 25, 26

GPS Global Positioning System. 21, 32

I

I2C Inter-Integrated Circuit. 12, 26

IHF Interface Homme Fusée. 6, 10, 11, 13, 28, 29, 30

IoT Internet des Objets (Internet of Things). 32

L

LORA Long Range. 21, 24, 25

M

MOSFET Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor (transistor à effet de champ à structure métal-oxyde-semiconducteur). 15, 18, 19

O

OOK On-Off Keying. 25

P

PWM Pulse Width Modulation. 11

R

RAM Random Access Memory. 12

S

SPI Serial Peripheral Interface. 12, 25

SWD Serial Wire Debug. 13

T

TDM Time Division Multiplexing. 24

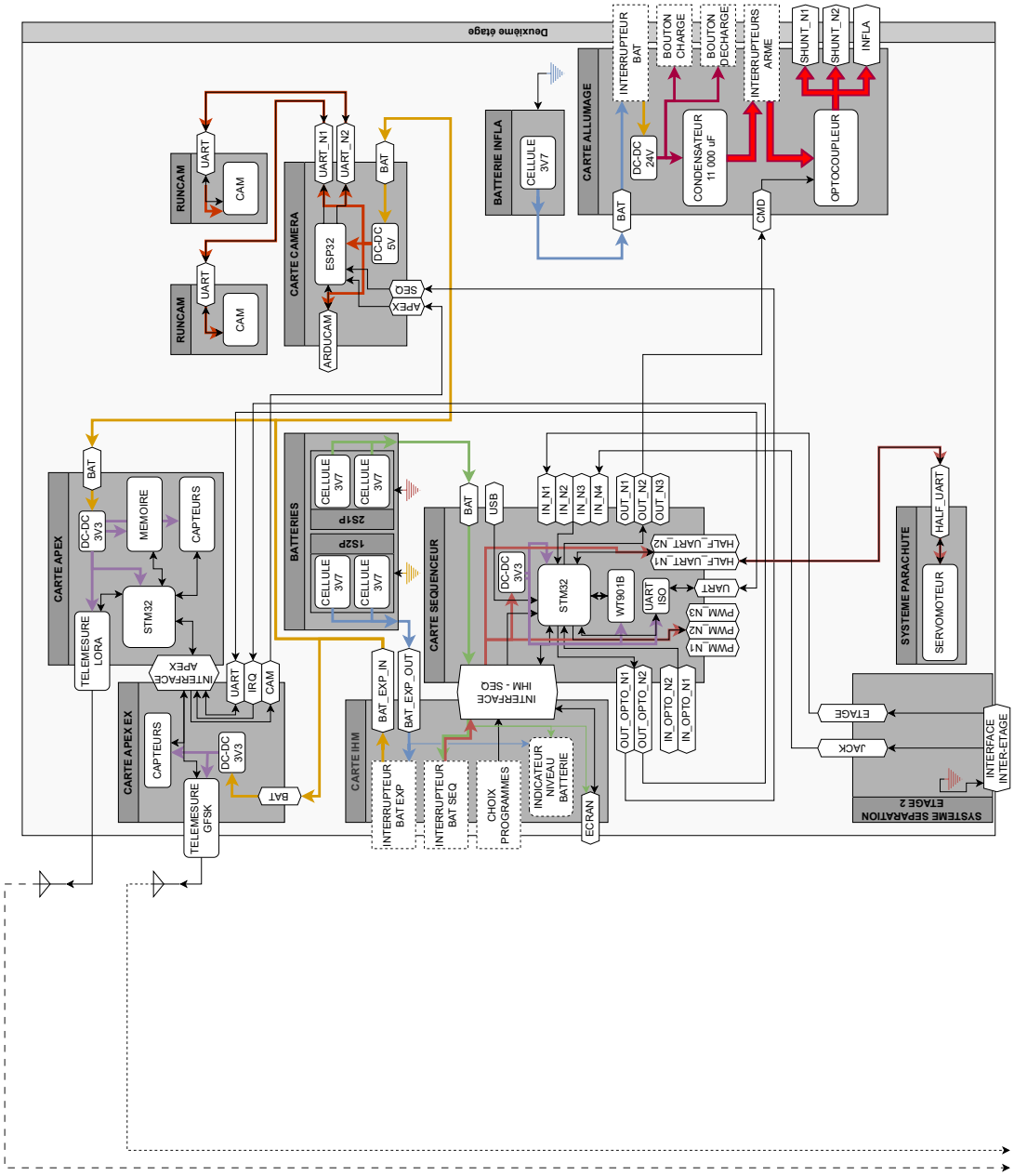
U

UART Universal Asynchronous Receiver-Transmitter. 5, 11, 12, 14, 25, 26

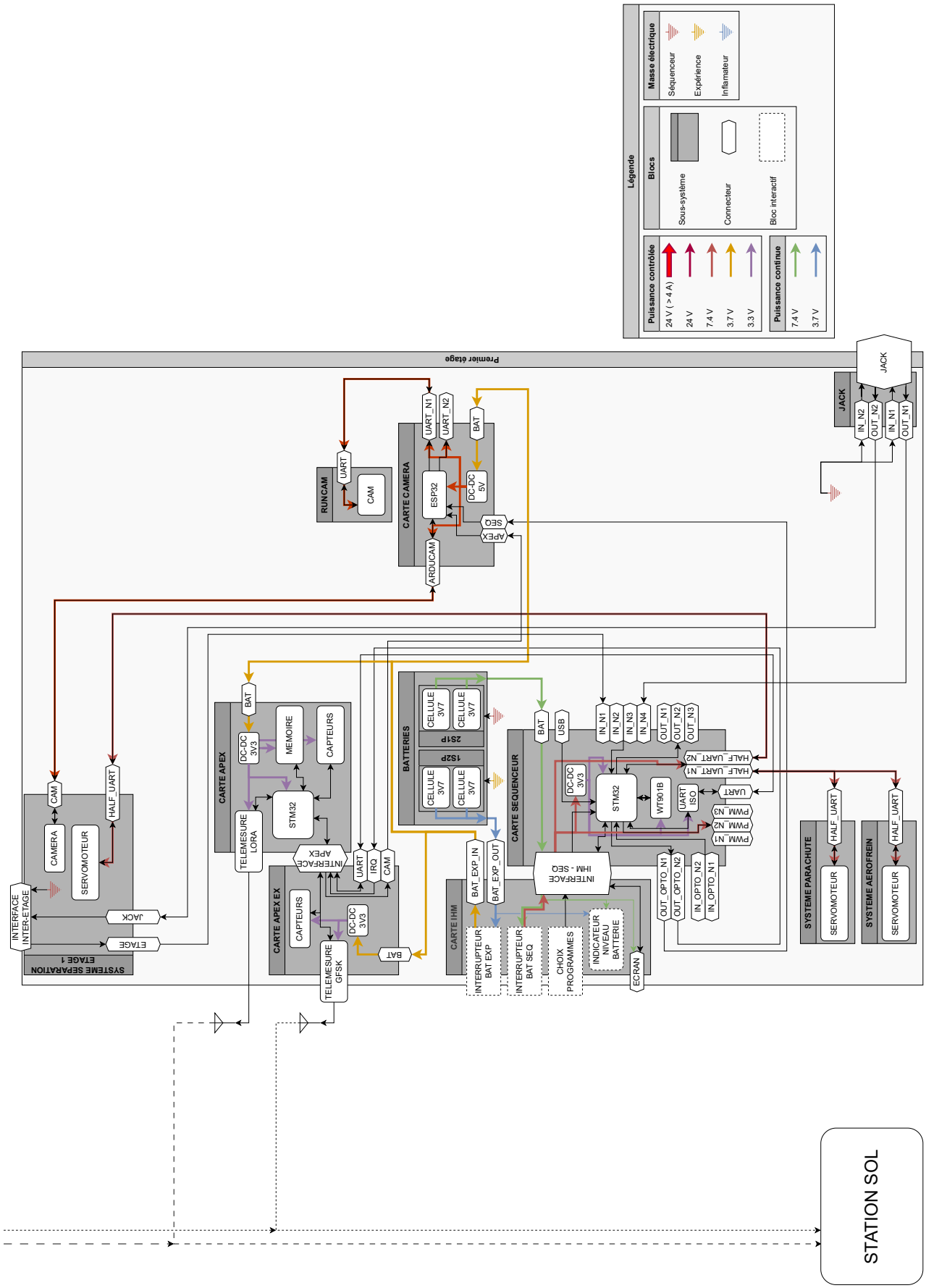
USB Universal Serial Bus. 11, 28, 29

A Synoptique de l'ensemble de la fusée

A.1 Deuxième étage

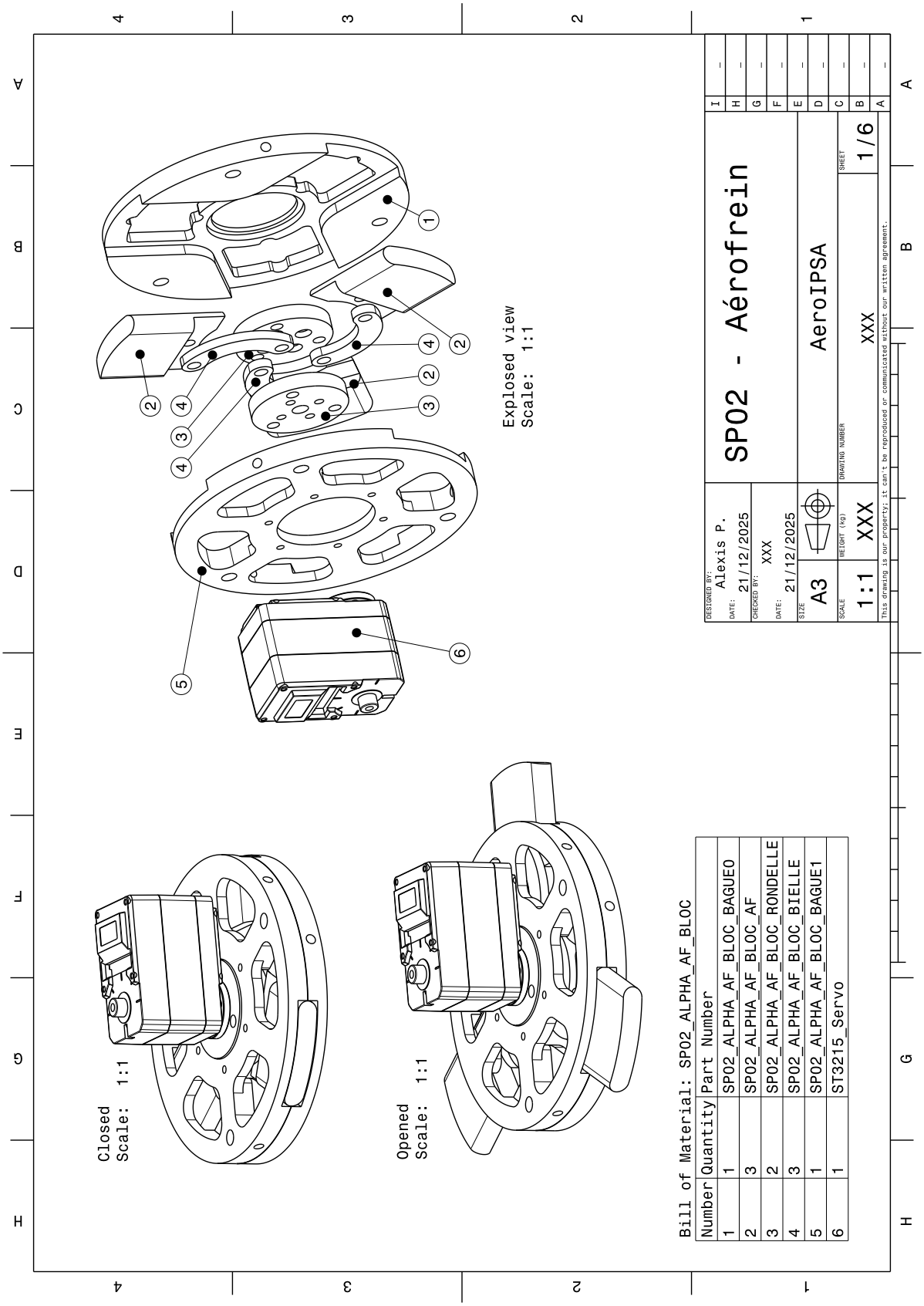


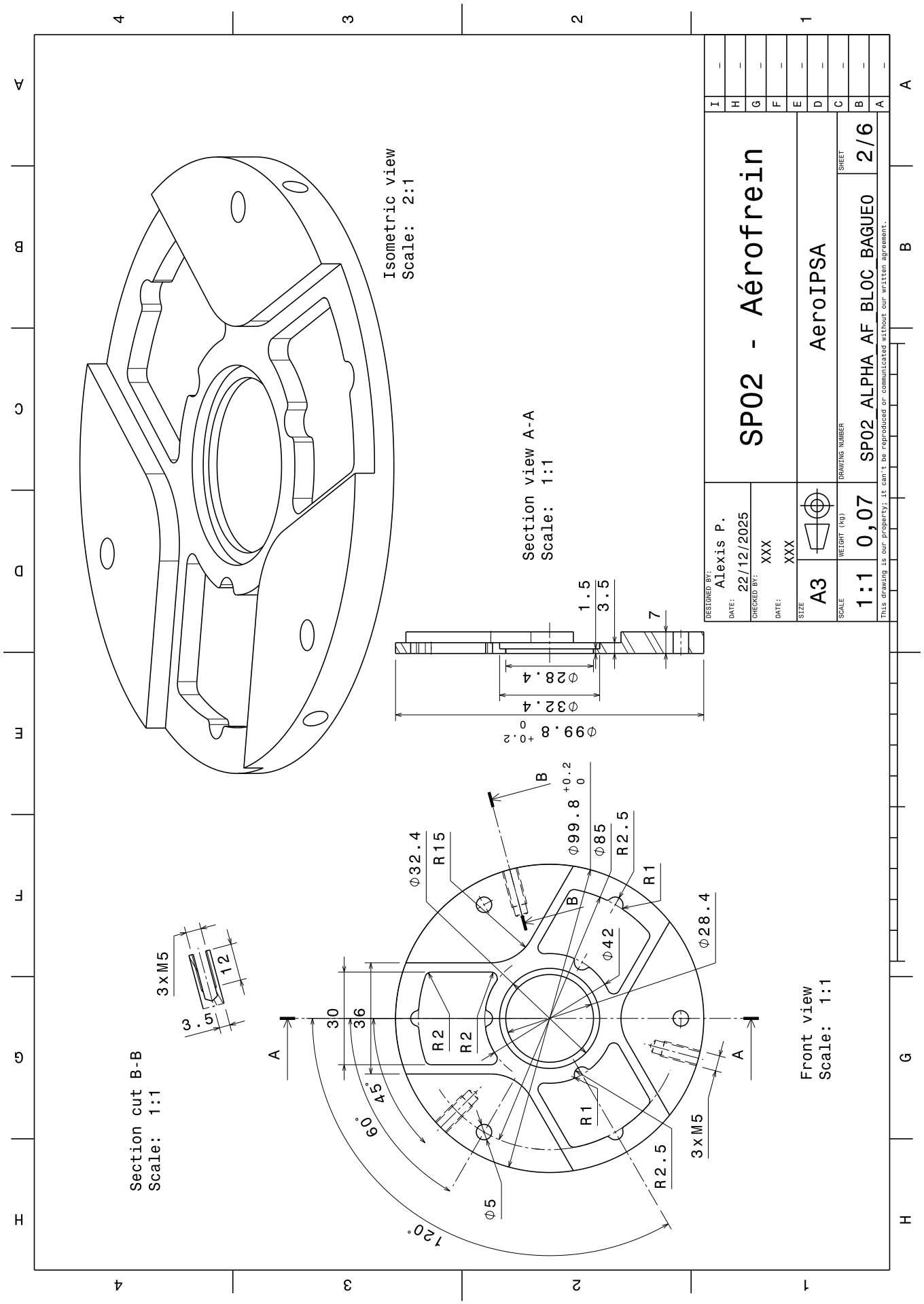
A.2 Premier étage

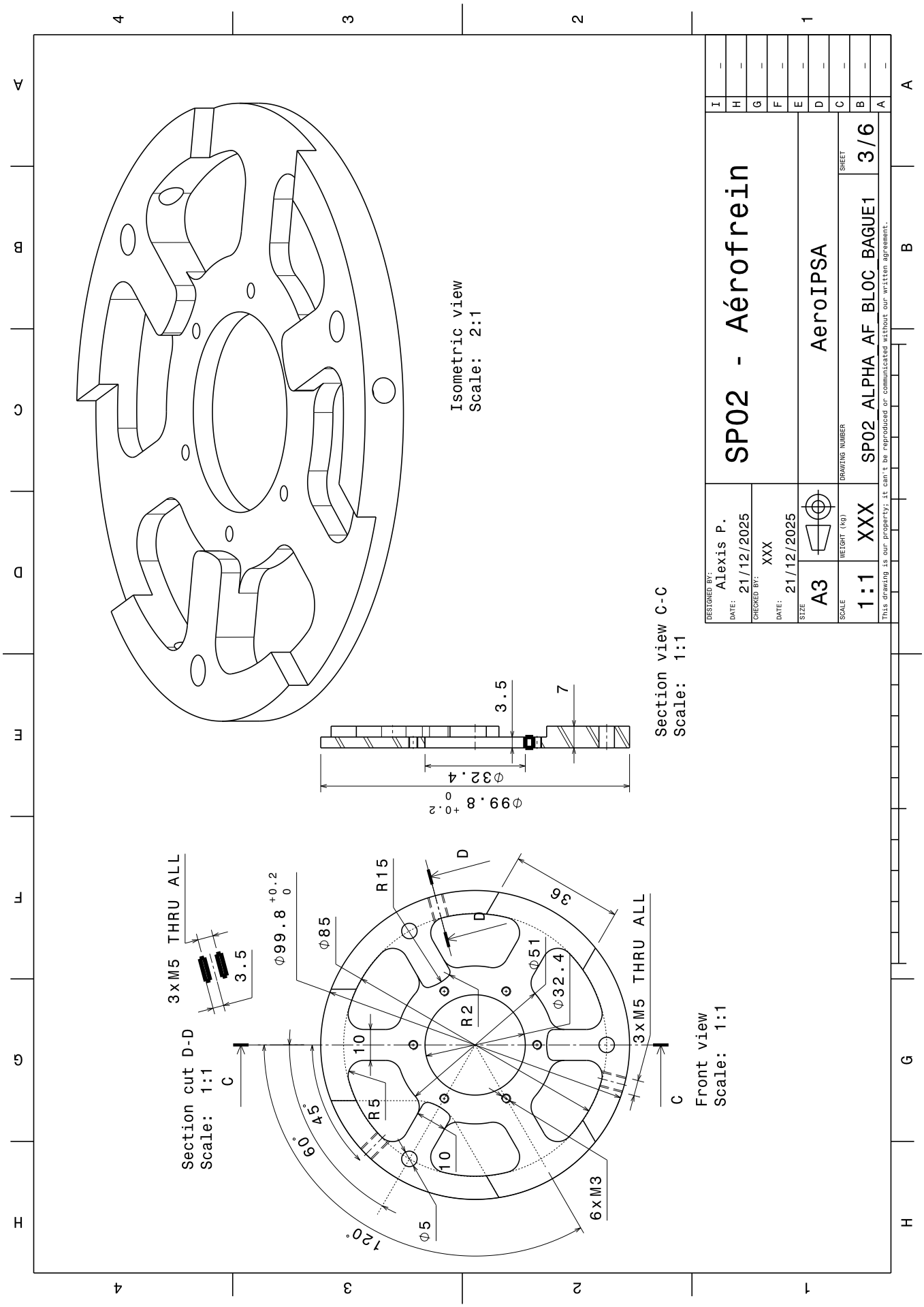


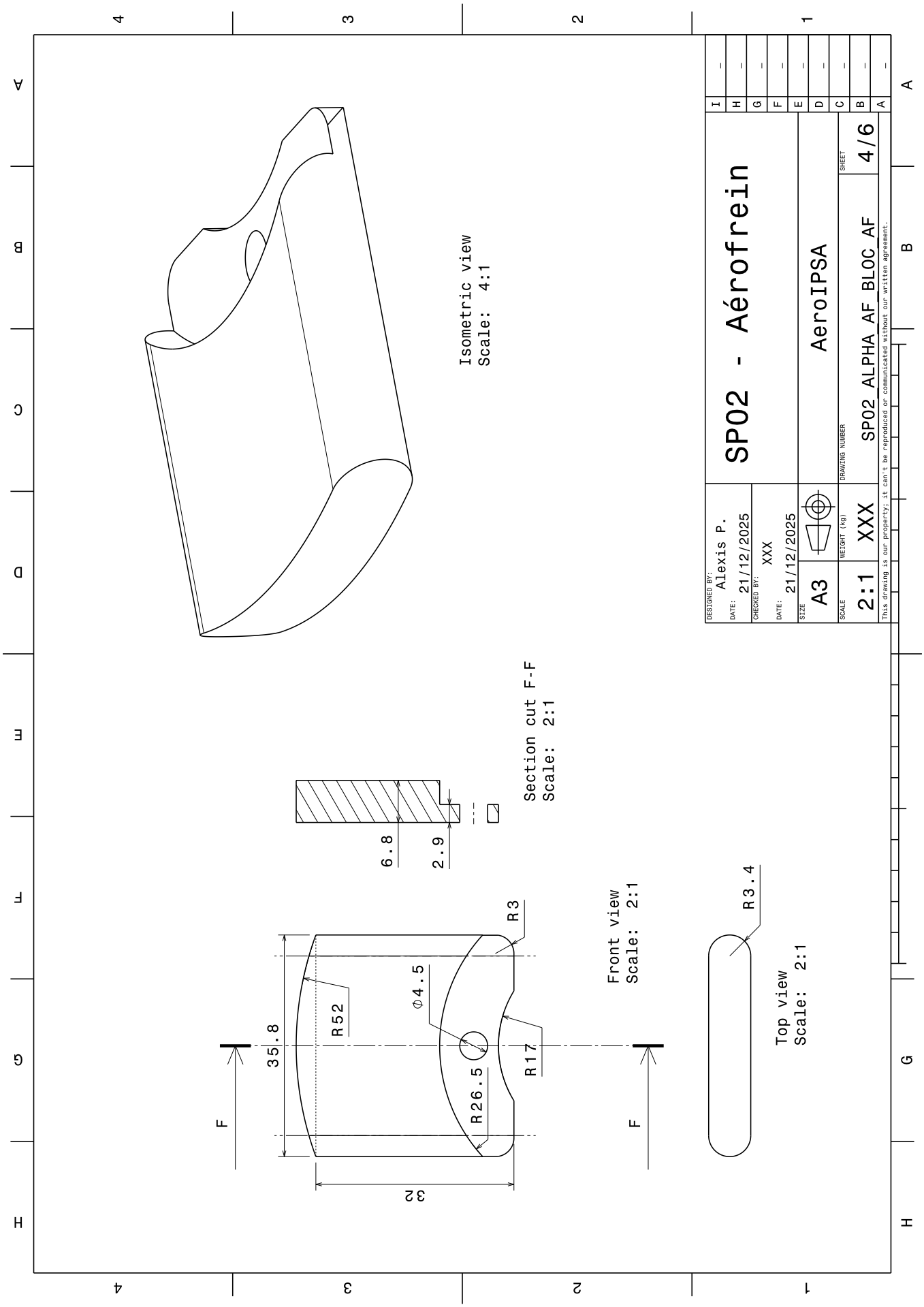
B Plan mécaniques

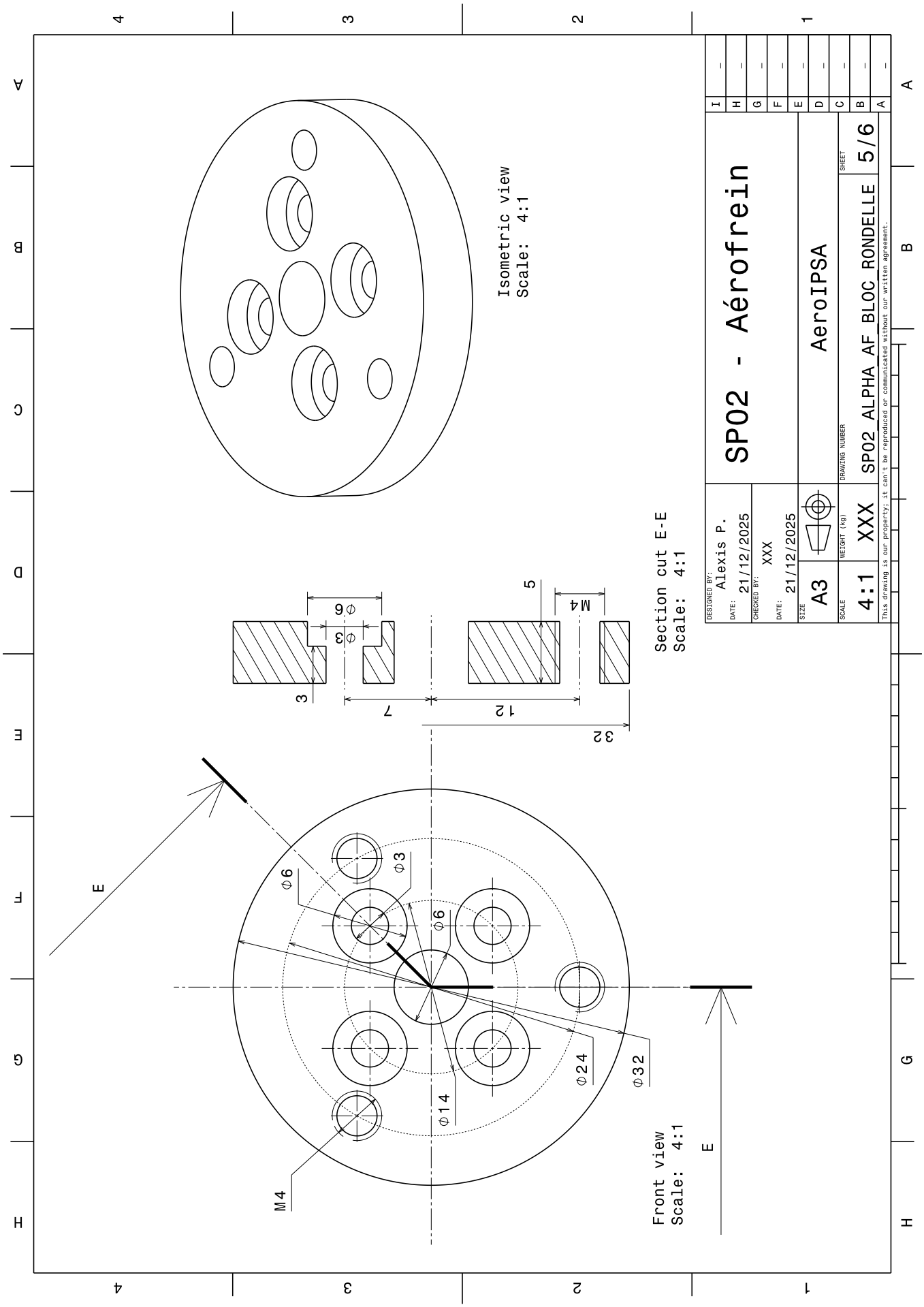
B.1 Système d'aérofreins

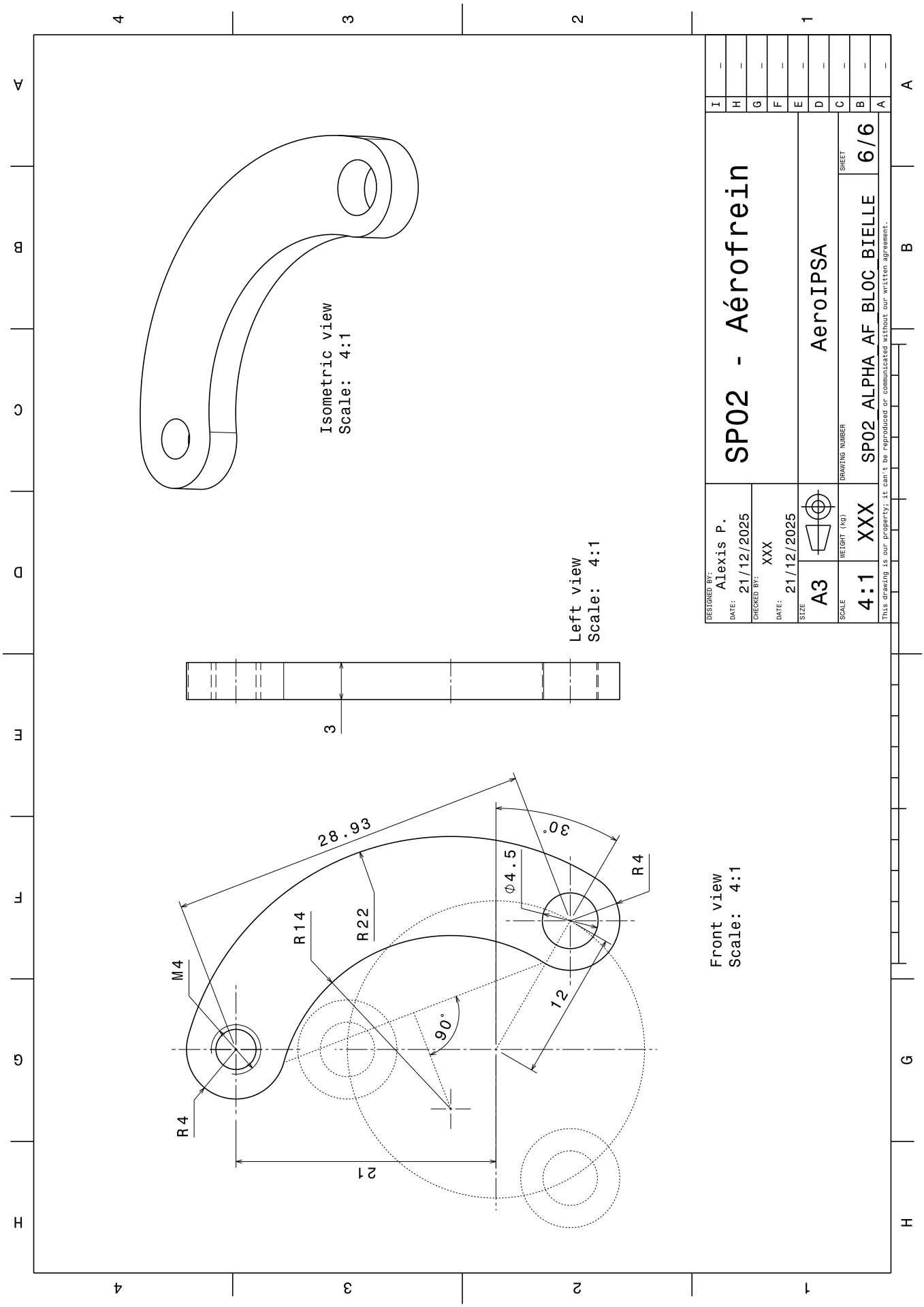



Isometric view
Scale: 2:1
Section view A-A
Scale: 1:1
Section cut B-B
Scale: 1:1
Front view
Scale: 1:1
SP02 - Aérofrein
AeroIPSA
SP02 ALPHA AF BLOC BAGUEO
DESIGNED BY: Alexis P.
DATE: 22/12/2025
CHECKED BY: XXX
DATE: XXX
SIZE A3
SCALE 1:1
WEIGHT (kg) 0,07
DRAWING NUMBER
SHEET 2/6
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.


Isometric view
Scale: 2:1
Section view C-C
Scale: 1:1
Front view
Scale: 1:1
Section cut D-D
Scale: 1:1
3xM5 THRU ALL
6xM3
R15
R5
R2
Φ85
Φ51
Φ32.4
Φ5
Φ99.8 +0.2 0
Φ32.4
Φ99.8 +0.2 0
3.5
7
36
10
45°
60°
120°
DESIGNED BY: Alexis P.
DATE: 21/12/2025
CHECKED BY: XXX
DATE: 21/12/2025
SIZE A3
SCALE 1:1
WEIGHT (kg) XXX
SP02 - Aérofrein
AeroIPSA
DRAWING NUMBER SP02 ALPHA AF BLOC BAGUE1
SHEET 3/6
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

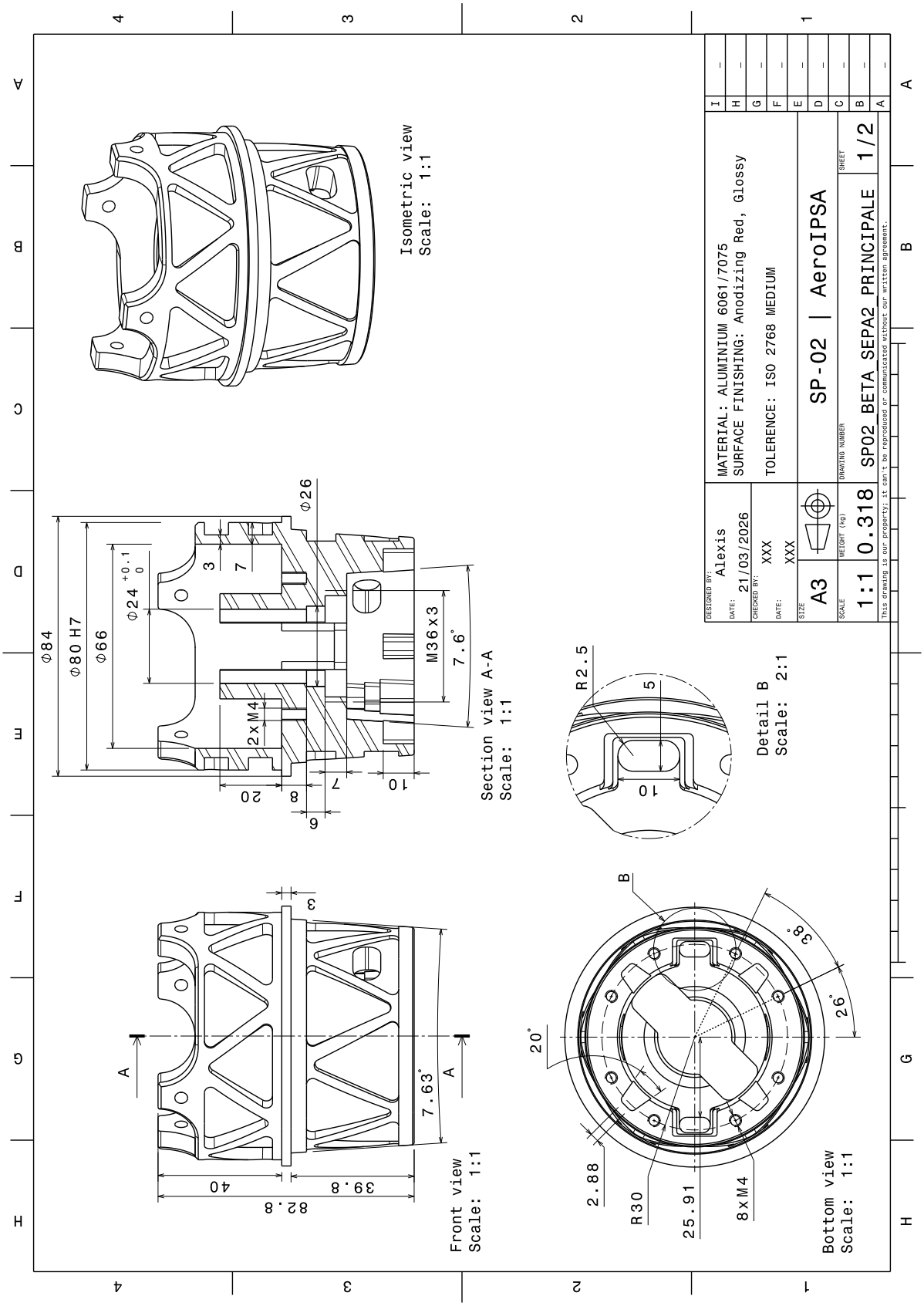

Isometric view
Scale: 4:1
Section cut F-F
Scale: 2:1
6.8
2.9
R3
Front view
Scale: 2:1
35.8
R52
Φ4.5
R26.5
R17
32
F
F
R3.4
Top view
Scale: 2:1
DESIGNED BY: Alexis P.
DATE: 21/12/2025
CHECKED BY: XXX
DATE: 21/12/2025
SIZE A3
SCALE 2:1
WEIGHT (kg) XXX
SP02 - Aérofrein
AeroIPSA
DRAWING NUMBER SP02 ALPHA AF BLOC AF
SHEET 4/6
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

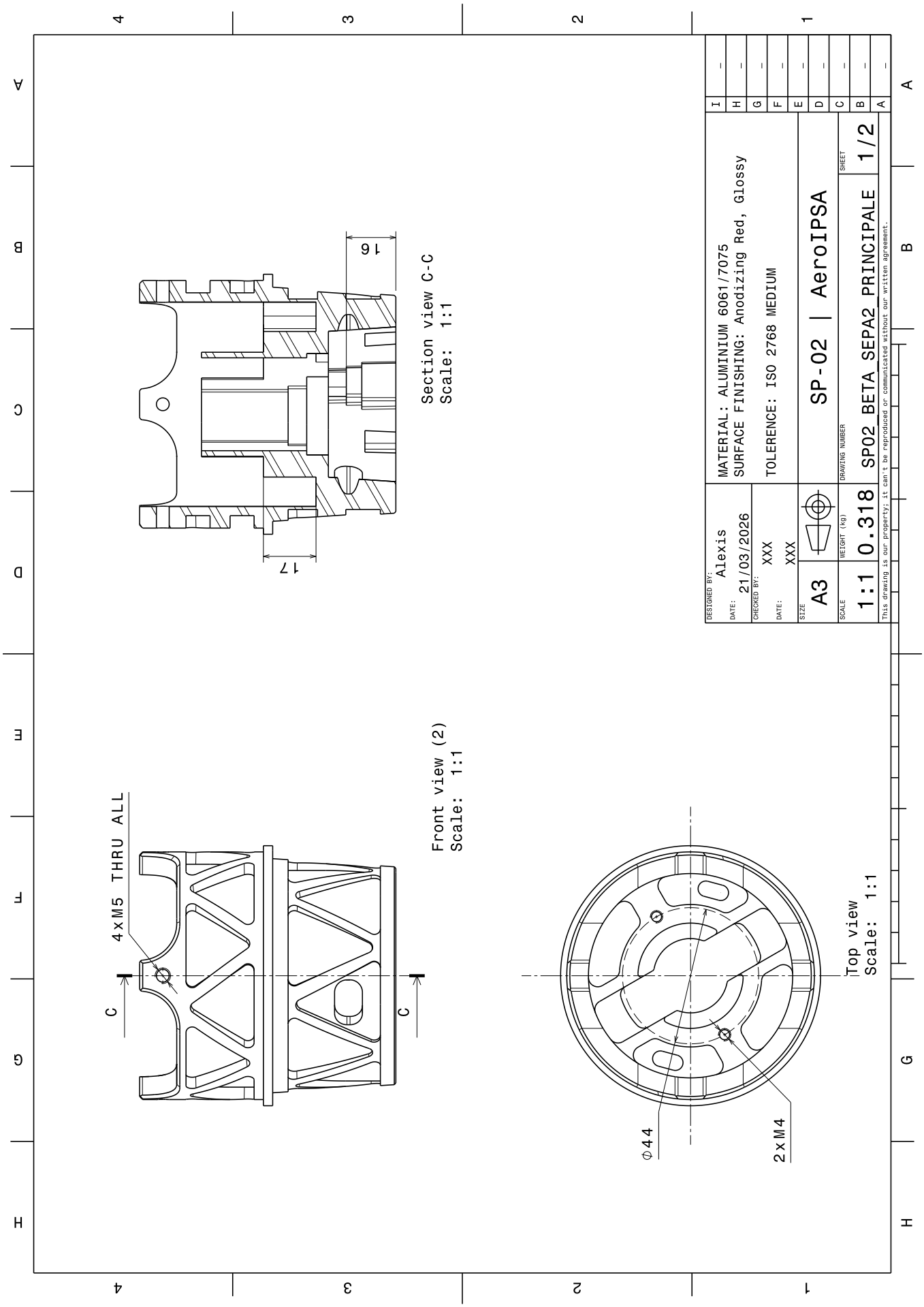

Isometric view
Scale: 4:1
Section cut E-E
Scale: 4:1
Front view
Scale: 4:1
E
E
Φ6
Φ3
Φ6
Φ14
Φ24
Φ32
M4
M4
Φ6
Φ3
3
7
12
32
5
DESIGNED BY: Alexis P.
DATE: 21/12/2025
CHECKED BY: XXX
DATE: 21/12/2025
SIZE A3
SCALE 4:1
WEIGHT (kg) XXX
SP02 - Aérofrein
AeroIPSA
DRAWING NUMBER SP02 ALPHA AF BLOC RONDELLE
SHEET 5/6
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.


Isometric view
Scale: 4:1
Left view
Scale: 4:1
Front view
Scale: 4:1
28.93
30°
Φ4.5
R4
R14
R22
M4
90°
12
21
3
DESIGNED BY: Alexis P.
DATE: 21/12/2025
CHECKED BY: XXX
DATE: 21/12/2025
SIZE A3
SCALE 4:1
WEIGHT (kg) XXX
DRAWING NUMBER SP02 ALPHA AF BLOC BIELLE
SHEET 6/6
SP02 - Aérofrein
AeroIPSA
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

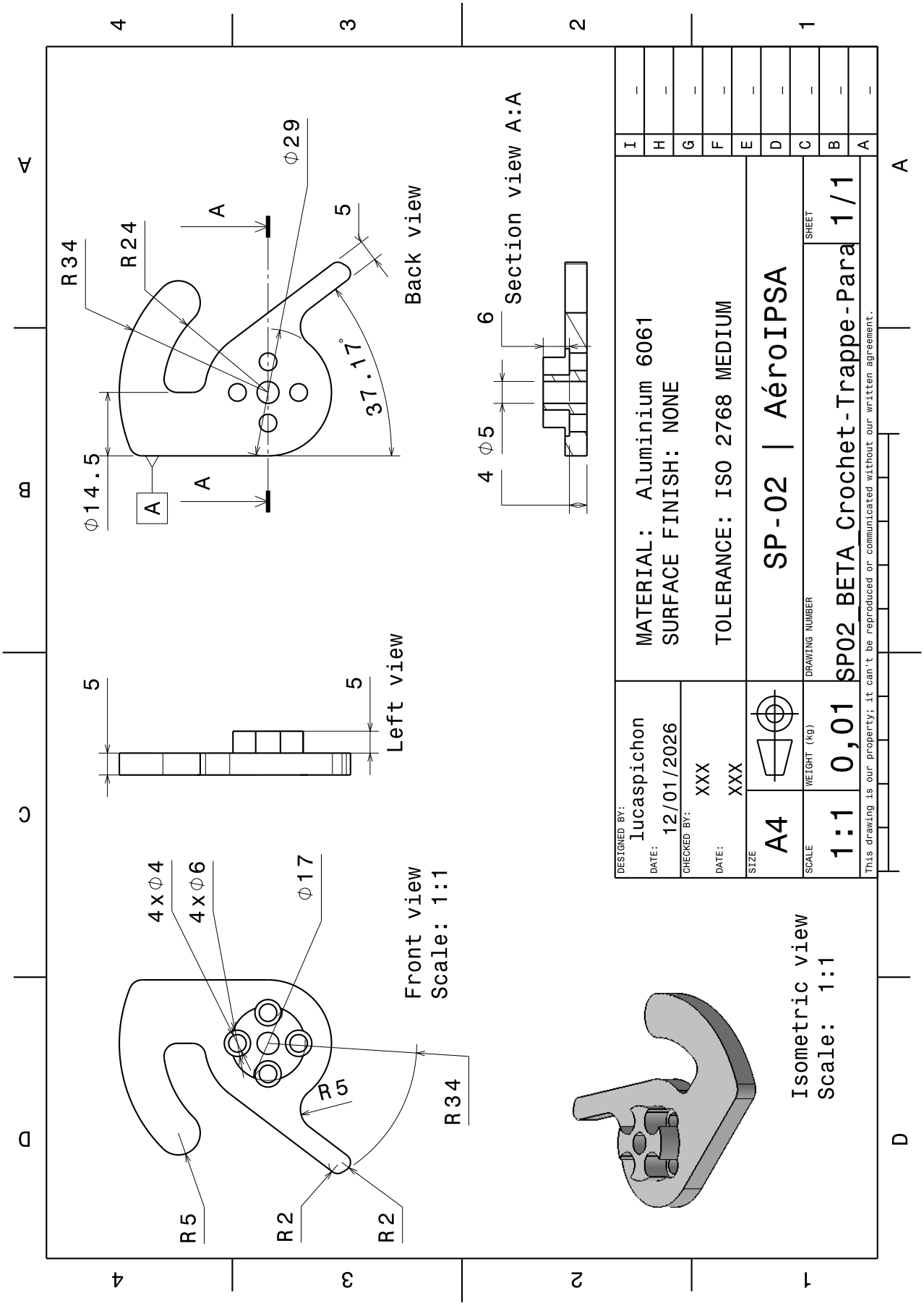
B.2 Séparation inter-étage

B.2.1 Deuxième étage

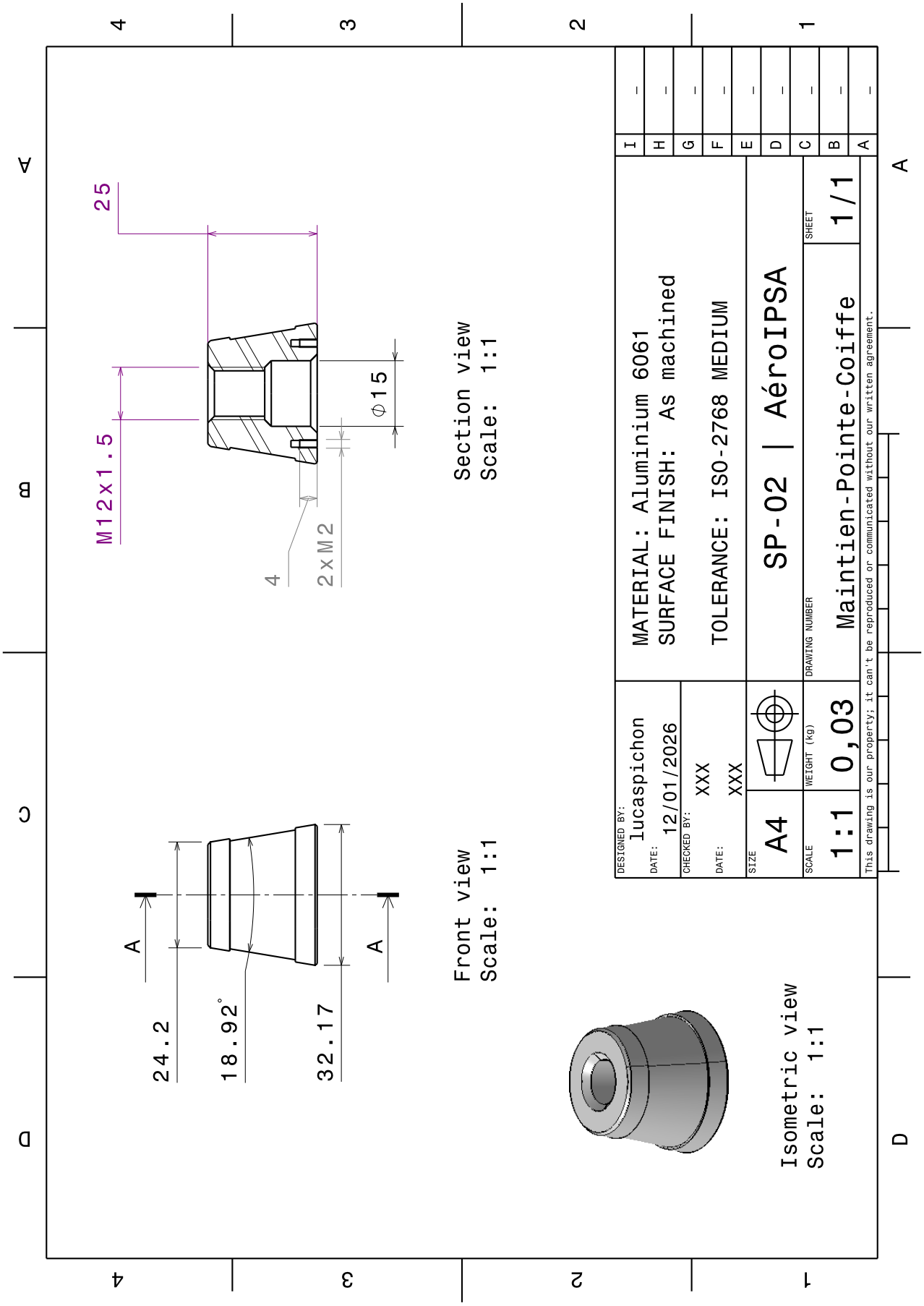



Section view C-C
Scale: 1:1
16
17
Front view (2)
Scale: 1:1
4xM5 THRU ALL
C
C
Top view
Scale: 1:1
Φ44
2xM4
MATERIAL: ALUMINIUM 6061/7075
SURFACE FINISHING: Anodizing Red, Glossy
TOLERENCE: ISO 2768 MEDIUM
DESIGNED BY: Alexis
DATE: 21/03/2026
CHECKED BY: XXX
DATE: XXX
SIZE A3
SCALE 1:1
WEIGHT (kg) 0.318
DRAWING NUMBER SP-02 | AeroIPSA
SP02 BETA SEPA2 PRINCIPALE
SHEET 1/2
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

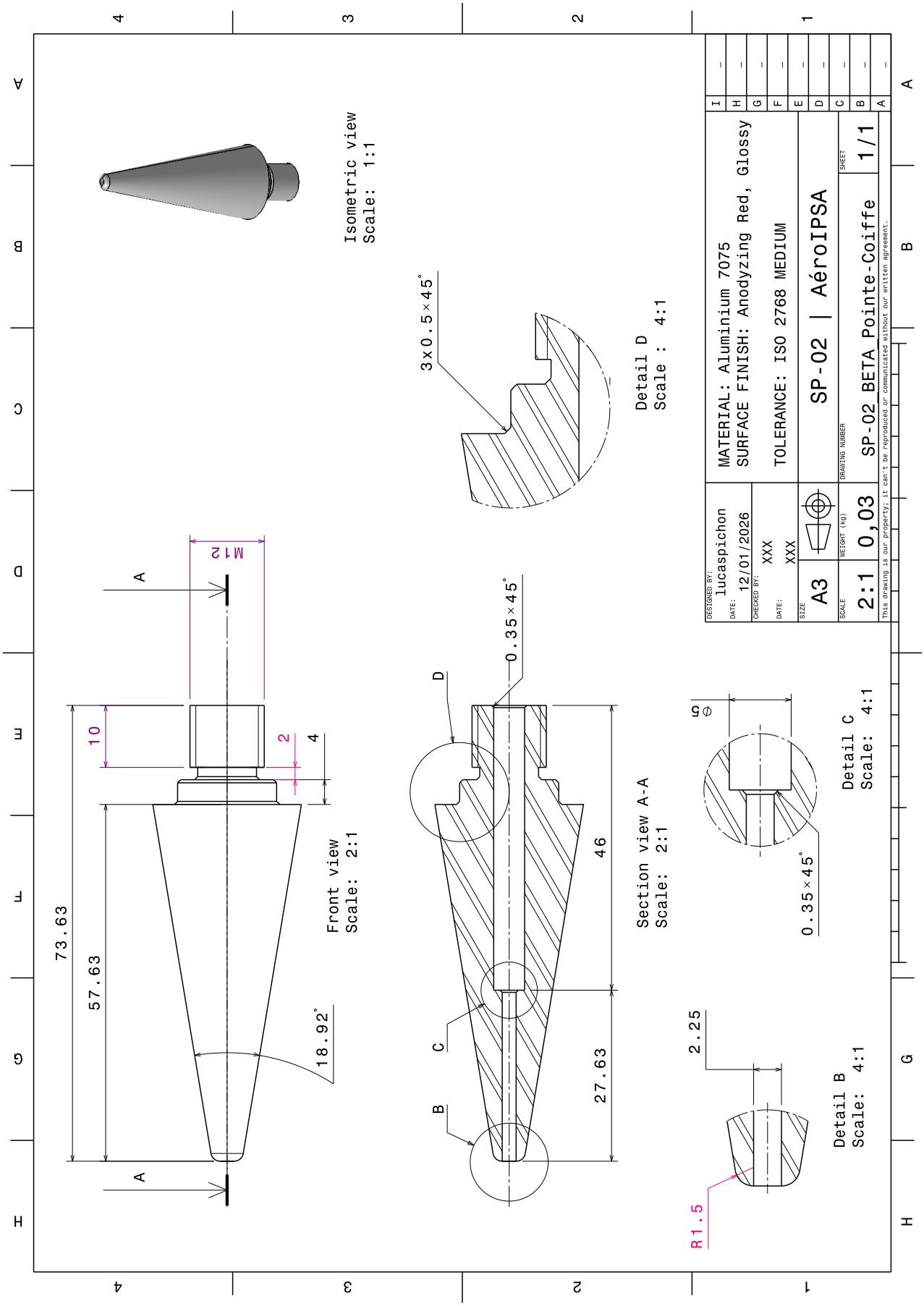
B.3 Crochet de trappe du deuxième étage



B.4 Système de maintien de la pointe de coiffe

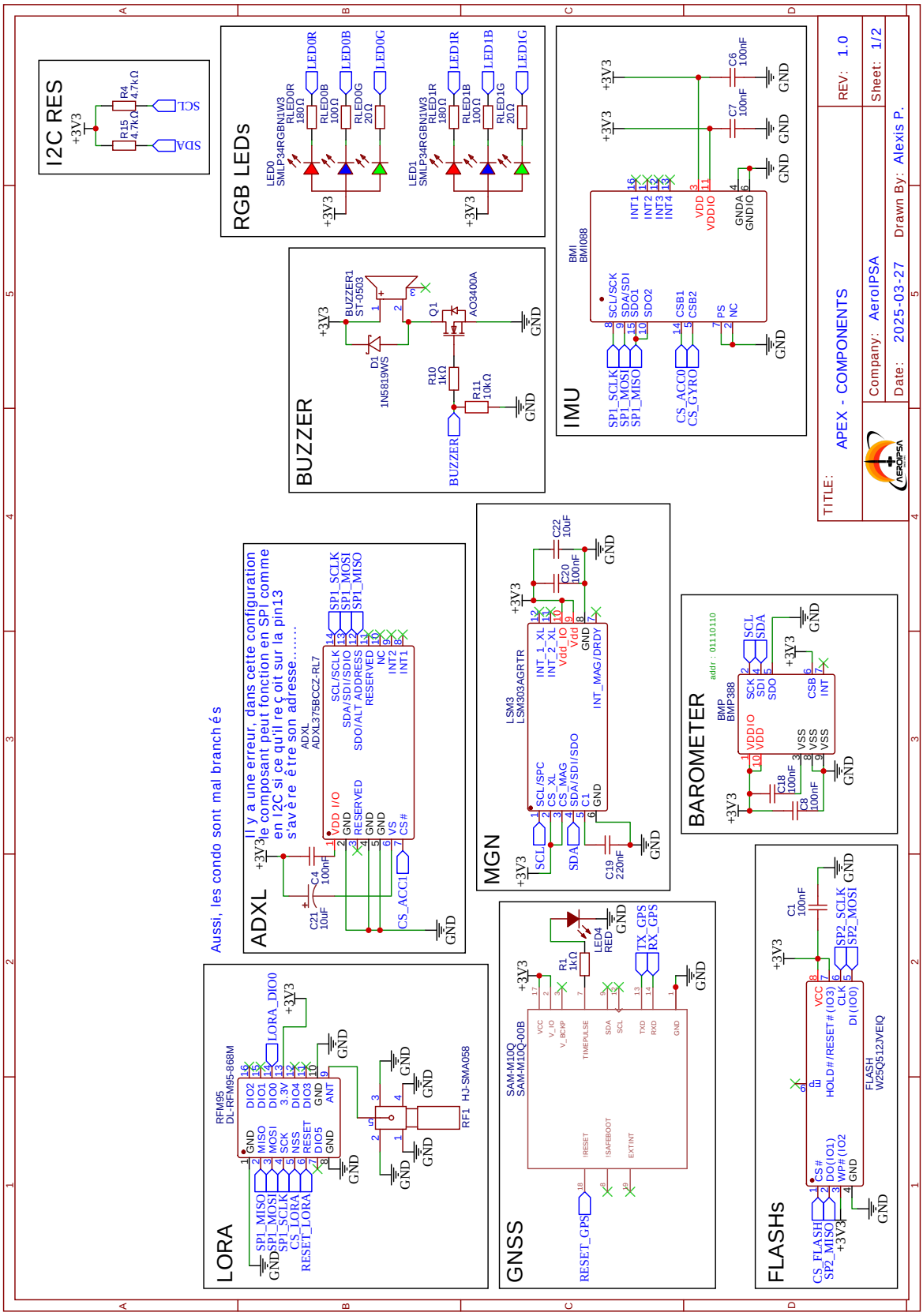


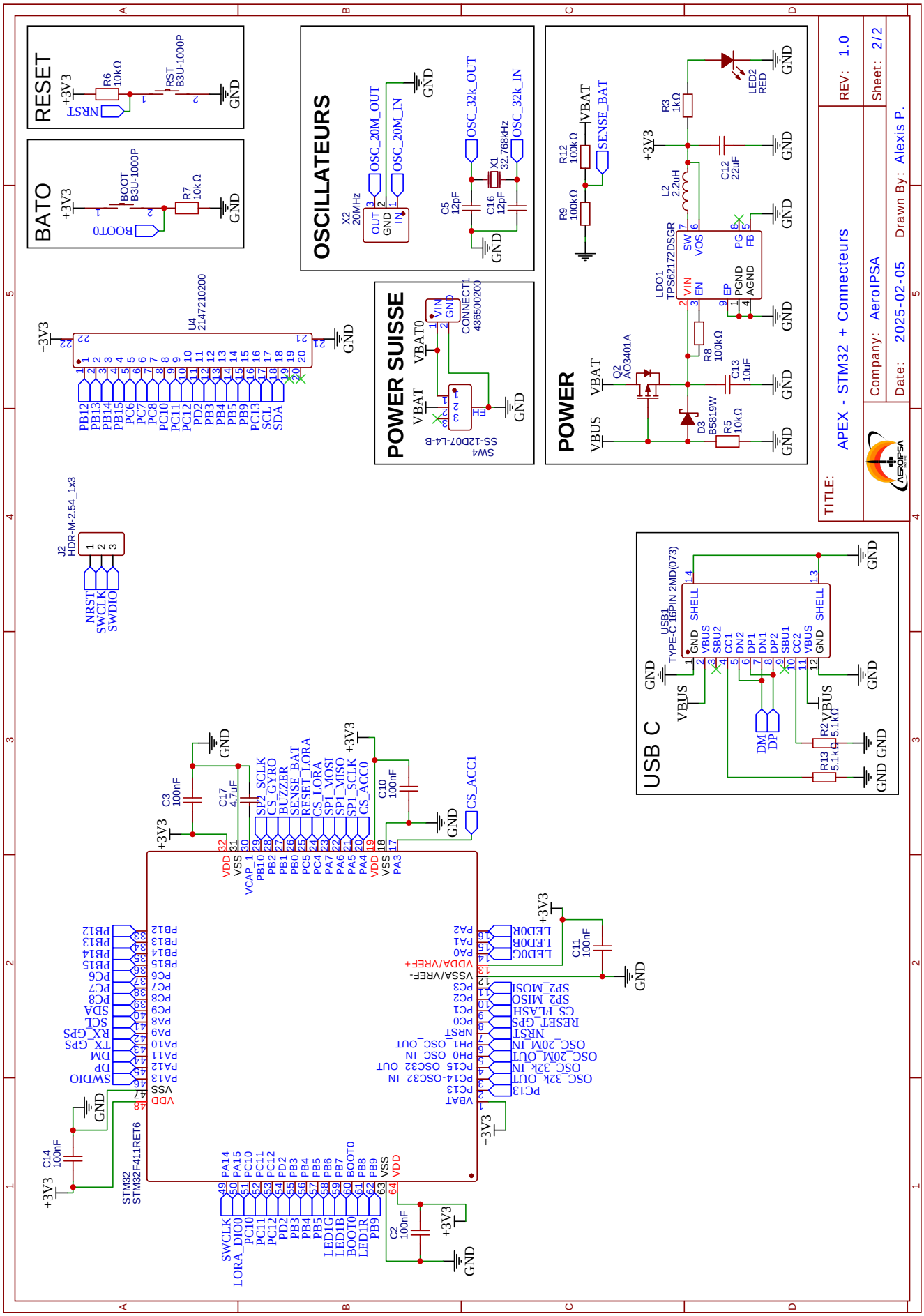
B.5 Pointe de coiffe



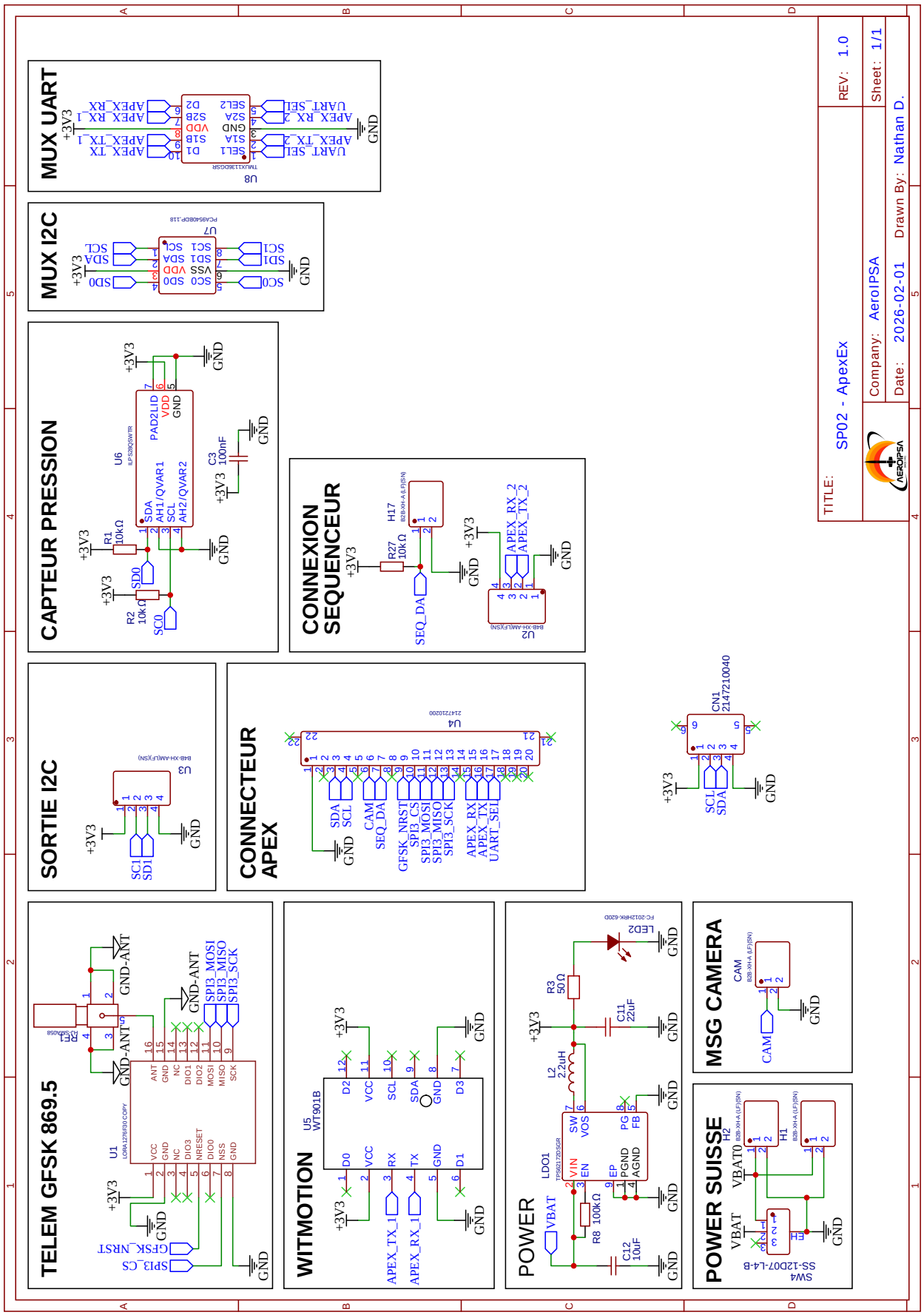
C Schématiques électriques

C.1 Apex

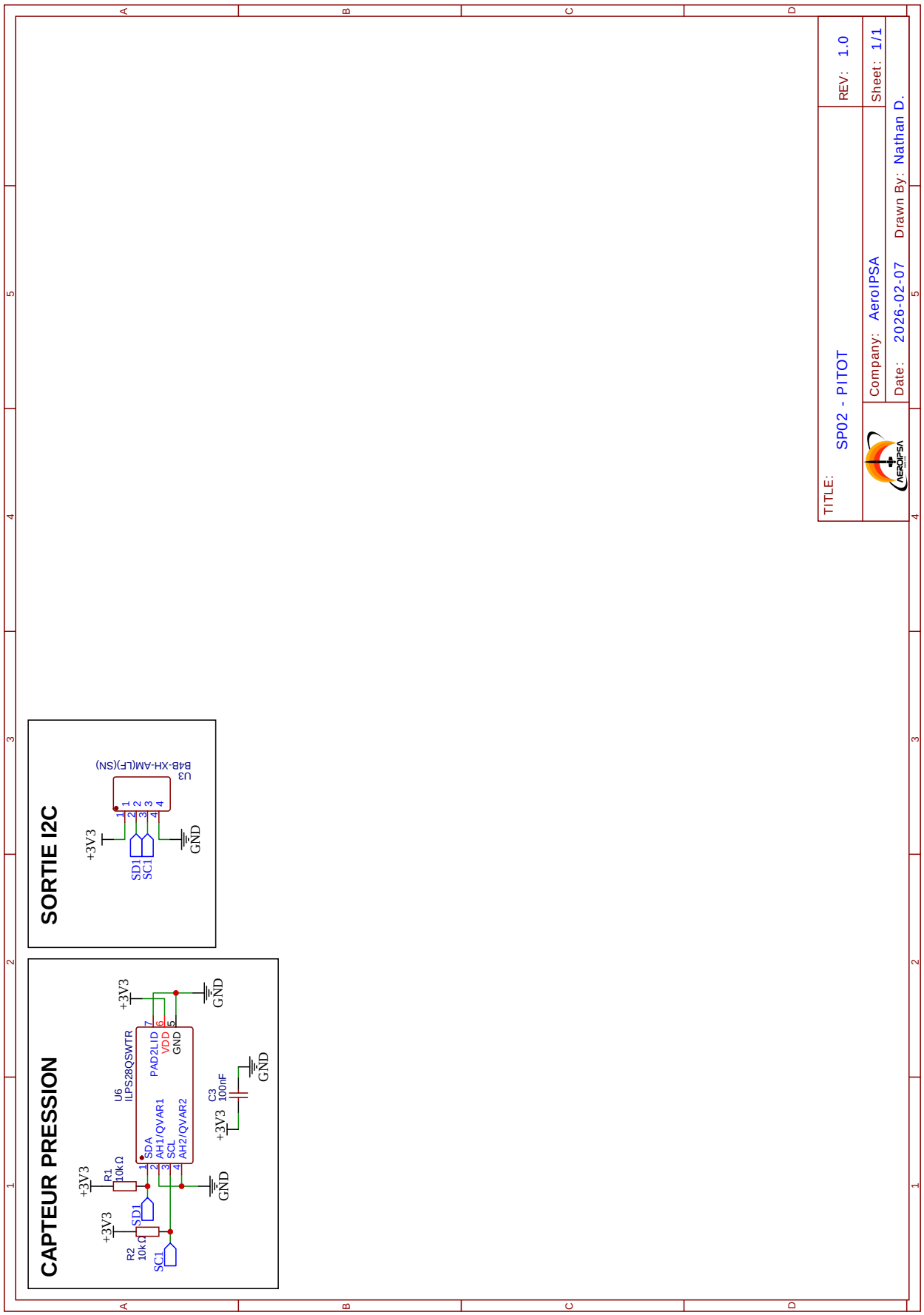



RESET
BATO
OSCILLATEURS
POWER SUISSE
POWER
USB C
TITLE:
APEX - STM32 + Connecteurs
REV: 1.0
Sheet: 2/2
Company: AeroIPSA
Date: 2025-02-05
Drawn By: Alexis P.
STM32
STM32F411RET6
U4
2147210200
J2
HDR-M-2.54_1x3
NRST
SWCLK
SWDIO
X2
20MHz
OSC_20M_OUT
OSC_20M_IN
X1
32.768kHz
OSC_32k_OUT
OSC_32k_IN
C5
12pF
C16
12pF
SW4
SS-12D07-L4-B
CONNECT1
436500200
VBAT0
VBAT
VBUS
Q2
AO3401A
D3
B5819W
R5
10kΩ
R8
100kΩ
R9
100kΩ
R12
100kΩ
SENSE_BAT
LDO1
TPS62172DSGR
L2
2.2uH
C12
22uF
C13
10uF
R3
1kΩ
LED2
RED
USB1
TYPE-C 16PIN 2MD(073)
R2
5.1kΩ
R13
5.1kΩ
DM
DP
C2
100nF
C3
100nF
C10
100nF
C11
100nF
C14
100nF
C17
4.7uF
+3V3
GND

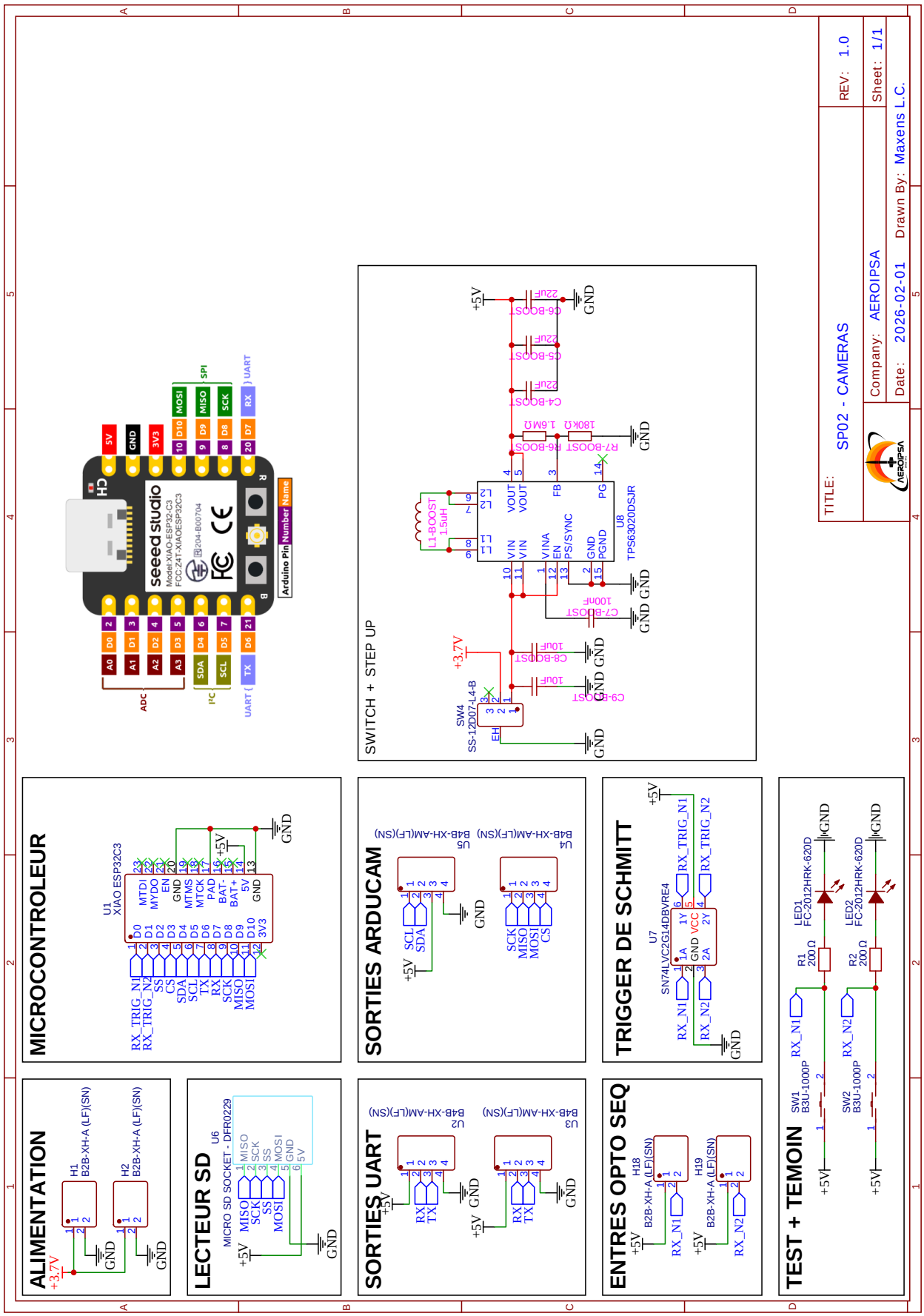
C.2 ApexEX


MUX UART
MUX I2C
CAPTEUR PRESSION
CONNEXION SEQUENCEUR
SORTIE I2C
CONNECTEUR APEX
TELEM GFSK 869.5
WITMOTION
POWER
MSG CAMERA
POWER SUISSE
TITLE: SP02 - ApexEx
REV: 1.0
Company: AeroIPSA
Sheet: 1/1
Date: 2026-02-01
Drawn By: Nathan D.

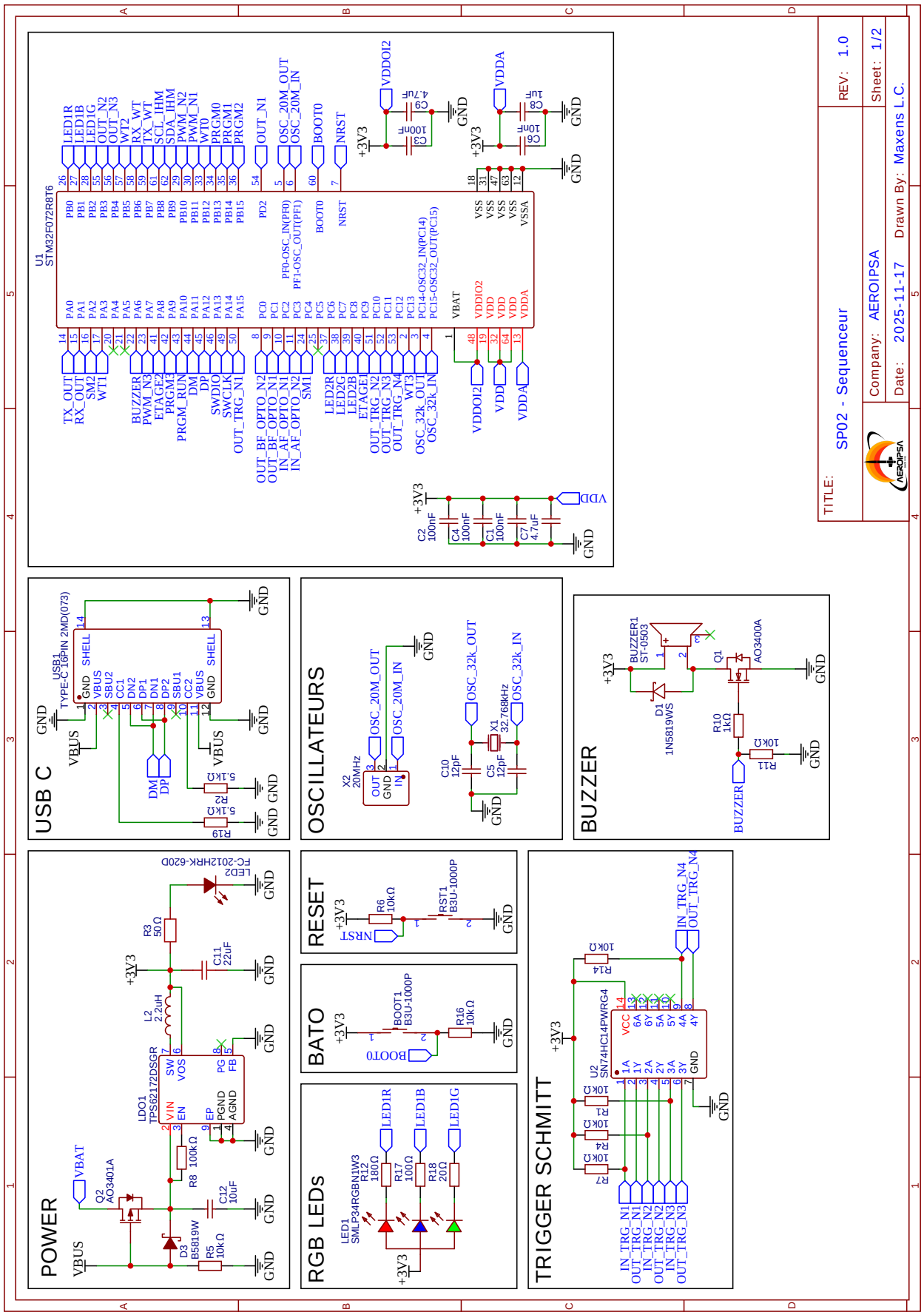
C.3 Pitot

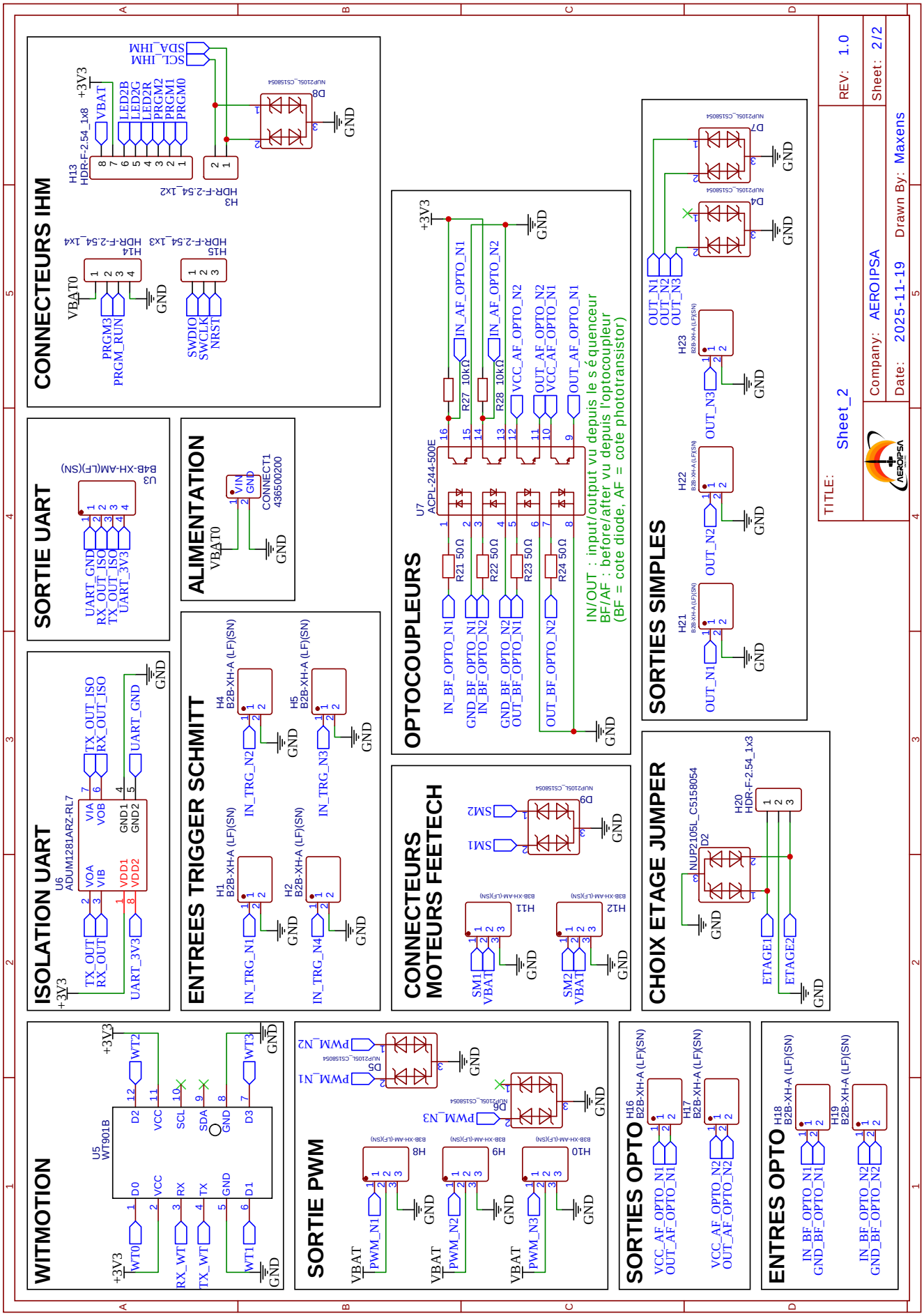

CAPTEUR PRESSION
+3V3
R1
10kΩ
R2
10kΩ
SD1
SC1
U6
ILPS28QSWTR
SDA
AH1/QVAR1
SCL
AH2/QVAR2
PAD2LID
VDD
GND
C3
100nF
GND
SORTIE I2C
U3
B4B-XH-AM(LF)(SN)
TITLE:
SP02 - PITOT
REV: 1.0
Company: AeroIPSA
Sheet: 1/1
Date: 2026-02-07
Drawn By: Nathan D.

C.4 Caméra

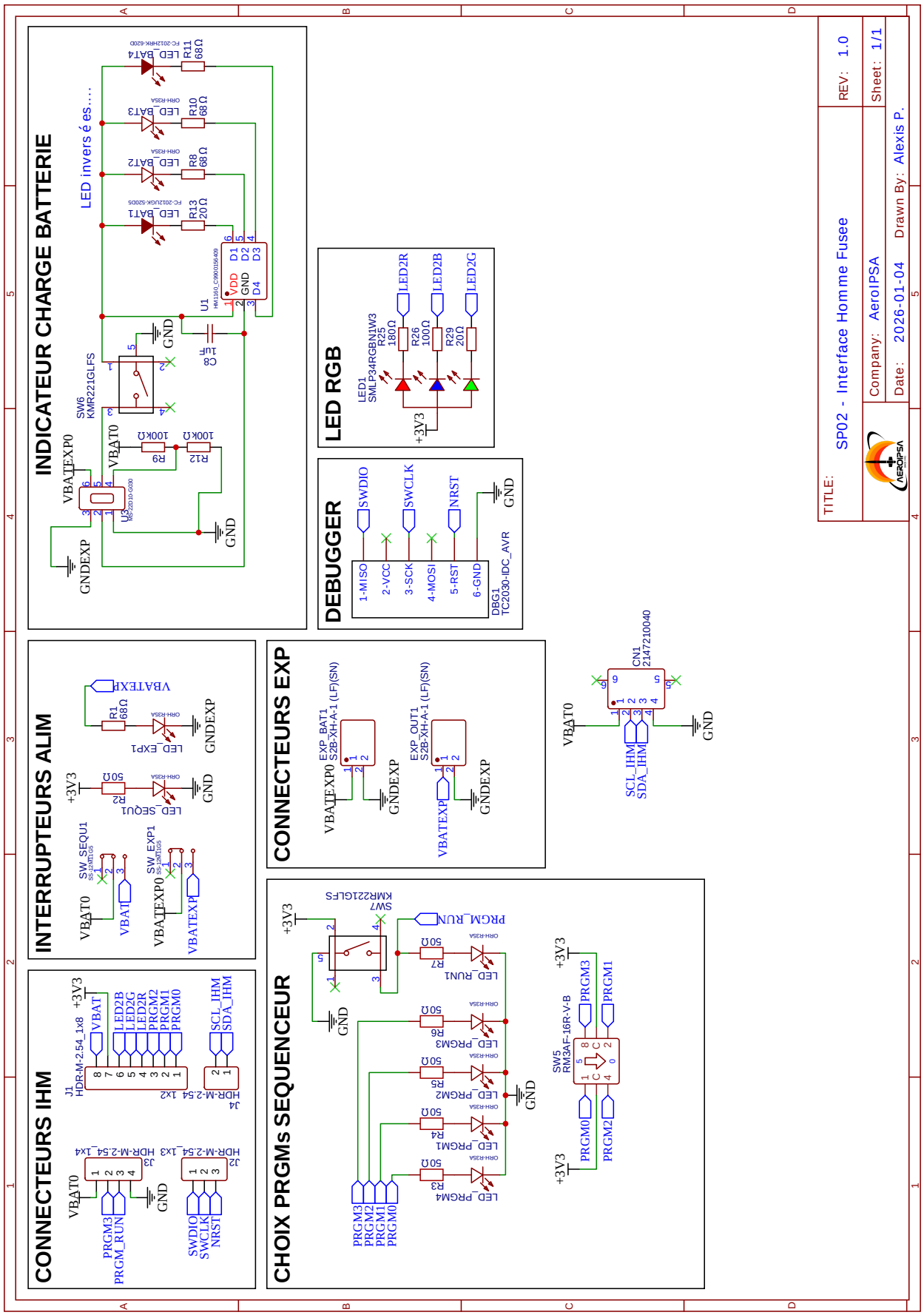

ALIMENTATION
MICROCONTROLEUR
SWITCH + STEP UP
LECTEUR SD
SORTIES ARDUCAM
TRIGGER DE SCHMITT
SORTIES UART
ENTRES OPTO SEQ
TEST + TEMOIN
TITLE: SP02 - CAMERAS
REV: 1.0
Company: AEROIPSA
Sheet: 1/1
Date: 2026-02-01
Drawn By: Maxens L.C.

C.5 Sequenceur

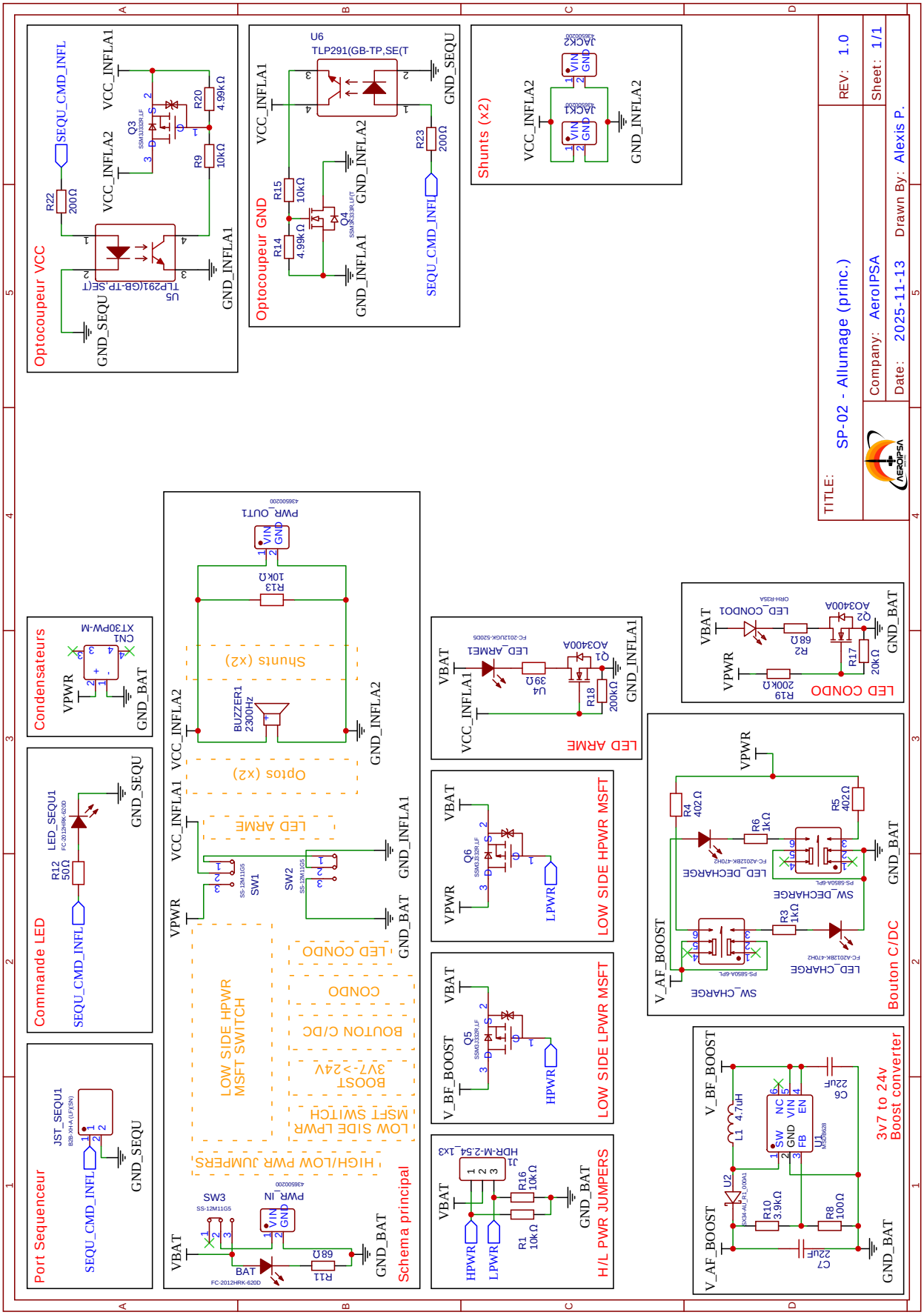



CONNECTEURS IHM
H13
HDR-F-2.54_1x8
VBAT
LED2B
LED2G
LED2R
PRGM2
PRGM1
PRGM0
SDA_IHM
SCL_IHM
+3V3
D8
NUP2105L_C5158054
GND
H3
HDR-F-2.54_1x2
VBAT0
H14
HDR-F-2.54_1x4
PRGM3
PRGM_RUN
H15
HDR-F-2.54_1x3
SWDIO
SWCLK
NRST
SORTIE UART
U3
B4B-XH-AM(LF)(SN)
UART_GND
RX_OUT_ISO
TX_OUT_ISO
UART_3V3
ALIMENTATION
CONNECT1
436500200
VIN
ISOLATION UART
U6
ADUM1281ARZ-RL7
VOA
VIB
VIA
VOB
VDD1
VDD2
GND1
GND2
TX_OUT
RX_OUT
ENTREES TRIGGER SCHMITT
H1
H2
H4
H5
B2B-XH-A (LF)(SN)
IN_TRG_N1
IN_TRG_N2
IN_TRG_N3
IN_TRG_N4
OPTOCOUPLEURS
U7
ACPL-244-500E
R21 50Ω
R22 50Ω
R23 50Ω
R24 50Ω
R27 10kΩ
R28 10kΩ
IN_BF_OPTO_N1
GND_BF_OPTO_N1
IN_BF_OPTO_N2
GND_BF_OPTO_N2
OUT_BF_OPTO_N1
OUT_BF_OPTO_N2
IN_AF_OPTO_N1
IN_AF_OPTO_N2
VCC_AF_OPTO_N2
OUT_AF_OPTO_N2
VCC_AF_OPTO_N1
OUT_AF_OPTO_N1
IN/OUT : input/output vu depuis le séquenceur
BF/AF : before/after vu depuis l'optocoupleur
(BF = cote diode, AF = cote phototransistor)
SORTIES SIMPLES
H21
H22
H23
OUT_N1
OUT_N2
OUT_N3
D4
D7
CONNECTEURS MOTEURS FEETECH
D9
SM1
SM2
H11
H12
CHOIX ETAGE JUMPER
D2
NUP2105L_C5158054
H20
HDR-F-2.54_1x3
ETAGE1
ETAGE2
TITLE:
Sheet_2
REV: 1.0
Sheet: 2/2
Company: AEROIPSA
Date: 2025-11-19
Drawn By: Maxens
WITMOTION
U5
WT901B
WT0
WT1
WT2
WT3
D0
D1
D2
D3
VCC
RX
TX
GND
SCL
SDA
RX_WT
TX_WT
SORTIE PWM
D5
D6
PWM_N1
PWM_N2
PWM_N3
H8
H9
H10
VBAT
SORTIES OPTO
H16
H17
B2B-XH-A (LF)(SN)
VCC_AF_OPTO_N1
OUT_AF_OPTO_N1
VCC_AF_OPTO_N2
OUT_AF_OPTO_N2
ENTRES OPTO
H18
H19
IN_BF_OPTO_N1
GND_BF_OPTO_N1
IN_BF_OPTO_N2
GND_BF_OPTO_N2

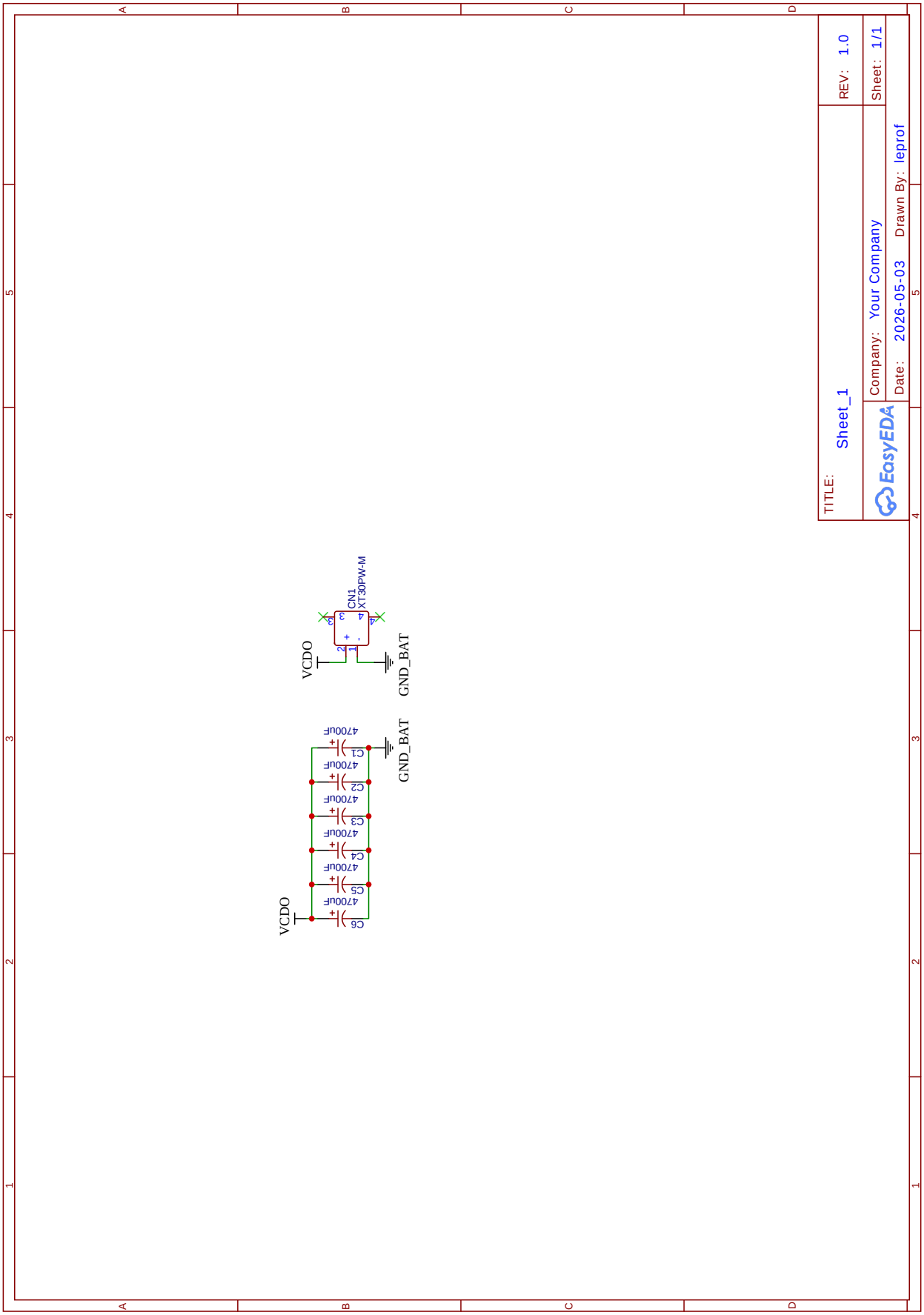
C.6 IHF


INDICATEUR CHARGE BATTERIE
LED invers é es....
LED_BAT4
LED_BAT3
LED_BAT2
LED_BAT1
R11 68Ω
R10 68Ω
R8 68Ω
R13 20Ω
U1
VDD D1
GND D2
D4 D3
C8 1µF
SW6 KMR221GLFS
VBATEXP0
VBAT0
R9 100KΩ
R12 100KΩ
GNDEXP
GND
LED RGB
LED1 SMLP34RGB1W3
R25 180Ω
R26 100Ω
R29 20Ω
LED2R
LED2B
LED2G
+3V3
DEBUGGER
1-MISO
2-VCC
3-SCK
4-MOSI
5-RST
6-GND
SWDIO
SWCLK
NRST
DBG1 TC2030-IDC_AVR
INTERRUPTEURS ALIM
VBATEXP
R1 68Ω
LED_EXP1
LED_SEQU1
R2 50Ω
SW_SEQU1
SW_EXP1
CONNECTEURS EXP
EXP_BAT1 S2B-XH-A-1 (LF)(SN)
EXP_OUT1 S2B-XH-A-1 (LF)(SN)
CN1 2147210040
SCL_IHM
SDA_IHM
CONNECTEURS IHM
J1 HDR-M-2.54_1x8
J4 HDR-M-2.54_1x2
J3 HDR-M-2.54_1x4
J2 HDR-M-2.54_1x3
PRGM3
PRGM_RUN
SWDIO
SWCLK
NRST
CHOIX PRGMs SEQUENCEUR
SW7 KMR221GLFS
PRGM_RUN
LED_RUN1
LED_PRGM3
LED_PRGM2
LED_PRGM1
LED_PRGM4
R7 50Ω
R6 50Ω
R5 50Ω
R4 50Ω
R3 50Ω
PRGM3
PRGM2
PRGM1
PRGM0
SW5 RM3AF-16R-V-B
TITLE: SP02 - Interface Homme Fusee
REV: 1.0
Company: AeroIPSA
Sheet: 1/1
Date: 2026-01-04
Drawn By: Alexis P.

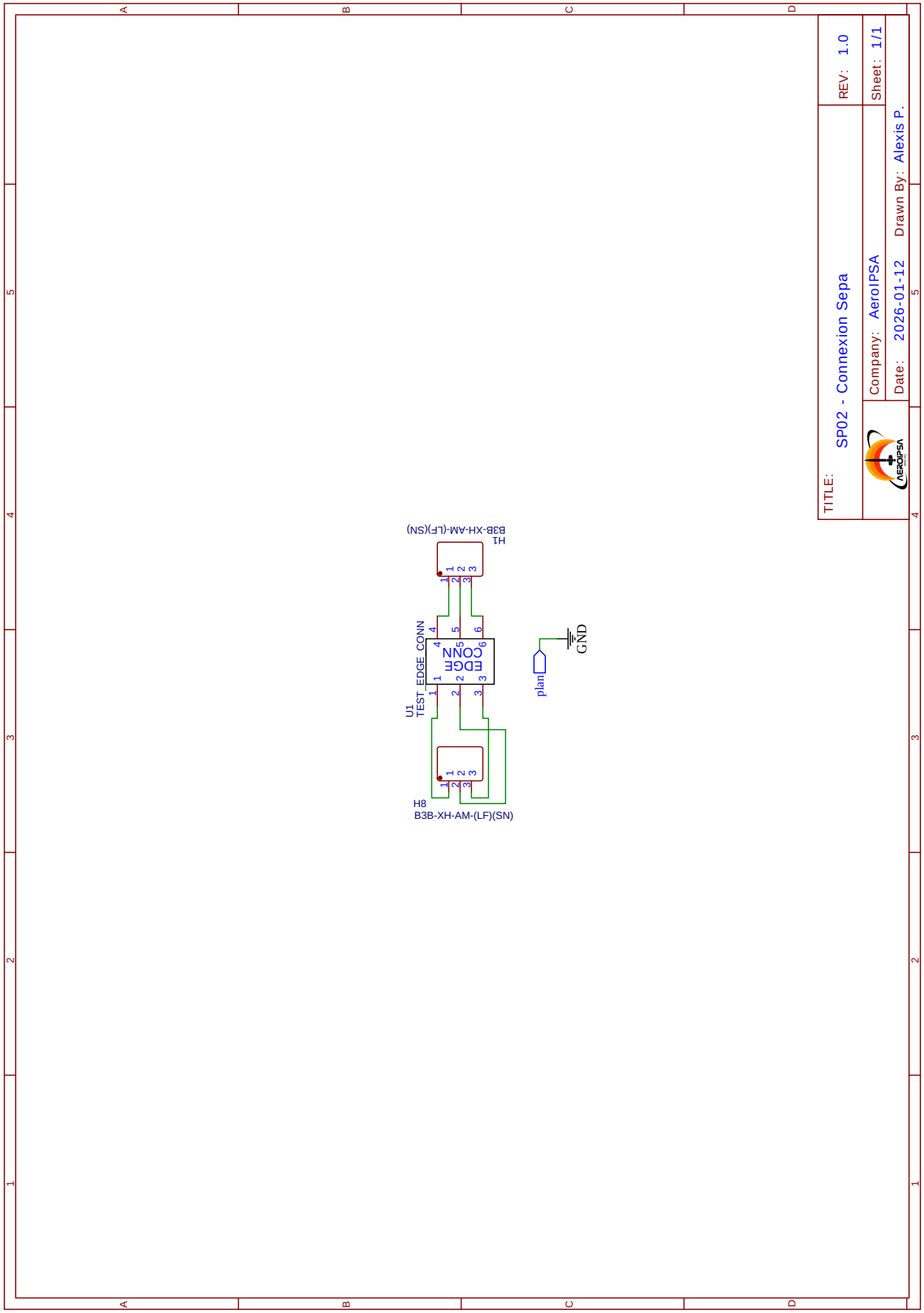
C.7 Allumage


Optocoupeur VCC
Optocoupeur GND
Shunts (x2)
Condensateurs
Commande LED
Port Sequenceur
Schema principal
LOW SIDE HPWR MSFT SWITCH
HIGH/LOW PWR JUMPERS
LOW SIDE LPWR MSFT SWITCH
BOOST 3V7->24V
BOUTON C/DC
CONDO
LED CONDO
LED ARME
Optos (x2)
LOW SIDE HPWR MSFT
LOW SIDE LPWR MSFT
H/L PWR JUMPERS
LED ARME
LED CONDO
Bouton C/DC
3v7 to 24v Boost converter
TITLE: SP-02 - Allumage (princ.)
REV: 1.0
Company: AeroIPSA
Sheet: 1/1
Date: 2025-11-13
Drawn By: Alexis P.

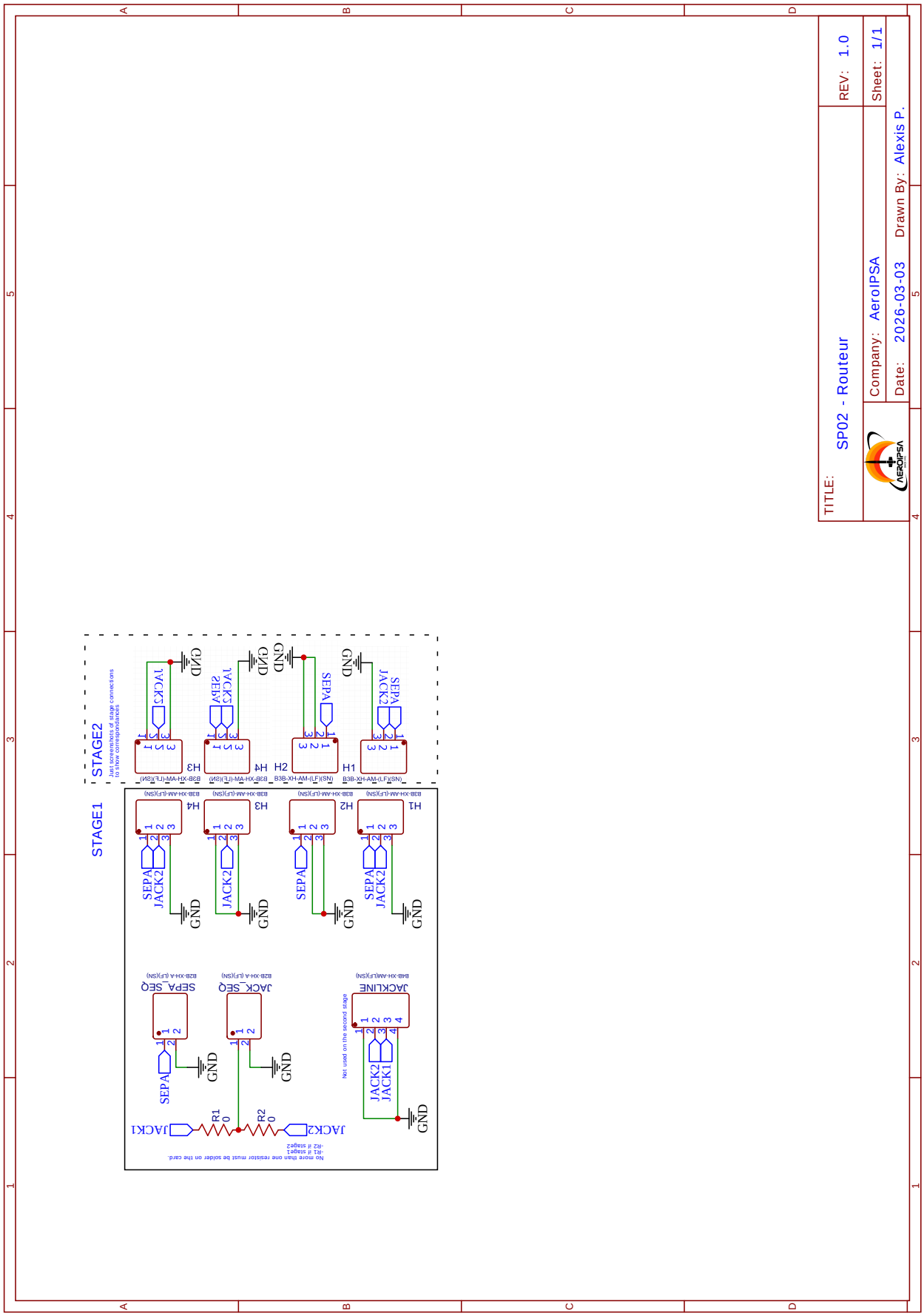
C.8 Condensateurs



C.9 Connexion séparation inter-étage



C.10 Routeur


STAGE1
STAGE2
Just screenshots of stage connections to show correspondances
No more than one resistor must be solder on the card:
-R1 if stage1
-R2 if stage2
Not used on the second stage
JACK1
JACK2
R1
0
R2
0
SEPA
GND
SEPA_SEQ
JACK_SEQ
JACKLINE
JACK2
JACK1
SEPA
JACK2
H1
H2
H3
H4
YCK5
SEPA
JACK2
TITLE:
SP02 - Routeur
REV: 1.0
Company: AeroIPSA
Sheet: 1/1
Date: 2026-03-03
Drawn By: Alexis P.