



COSMIC

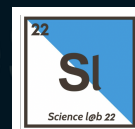
Collecte suborbitale de microparticules d'origine météorique

STUDENT EXPERIMENT DOCUMENTATION

Dossier scientifique et technique de l'expérience REXUS

Prélever dans la haute atmosphère des particules issues de la matière météoritique, les protéger jusqu'au retour au sol et relier leur analyse aux conditions exactes du vol.

Établissement porteur	Université de Bordeaux
Expérience	COSMIC – REXUS
Encadrement scientifique	Prof. Laura Alvarez
Association étudiante partenaire	ScienceLab 22



Équipe et environnement du projet

COSMIC est porté par des étudiants de l'Université de Bordeaux réunissant des compétences en physique, chimie, mécanique, électronique, programmation et communication scientifique. **Le projet est présenté dans ce SED comme une seule expérience** : la question scientifique, le comportement des particules, le mécanisme de collecte, l'acquisition des données et l'analyse post-vol sont reliés dans une même chaîne de mesure, depuis l'environnement traversé jusqu'au résultat de laboratoire.

Nom	Rôle	Nom	Rôle
Luna Mendes-Barrière	Cheffe de projet	Jérémy Bouillaud	Co-vice-chef de projet
Juliette Robert	Co-vice-cheffe de projet	Candice Dessard	Référente physique
Isaac Larsson	Référent ingénierie	Ambre Jarrier	Référente système embarqué
Victoria Lambert	Référente chimie	Nguissine Couderc	Référente communication
Lucie Lamberty	Membre du projet	Antoine Bloch	Membre du projet
Romain Lopez	Membre du projet	Emma van Gasteren	Membre du projet
		Rodríguez	
Paul Agrafel	Membre du projet	Naël Mousset	Membre du projet
Baptiste	Membre du projet	Mariia Vasyletska	Membre du projet
Thomas-Loizeau			
Maguy Charles	Membre du projet	Jean Khedy	Membre du projet
Hemy Forget	Membre du projet	Leïla Pinaud-Singam	Membre du projet

ScienceLab 22 accompagne le projet comme association étudiante partenaire. L'environnement scientifique et institutionnel du projet comprend également l'Université de Bordeaux, les laboratoires et structures avec lesquels des échanges techniques ou scientifiques sont menés, ainsi que les organismes du programme REXUS/BEXUS.



Figure 1 – Environnement institutionnel, scientifique et associatif du projet.

La figure 1 rassemble les structures qui accompagnent le projet sur des fonctions différentes : environnement universitaire, appui scientifique ou technique, programme de vol et soutien associatif. Elle situe le cadre dans lequel l'expérience est développée sans fragmenter la rédaction du SED en contributions séparées.

Table des matières

1	Introduction	3
1.1	Pourquoi COSMIC ?	3
1.2	Principe de l'expérience	3
1.3	Objectifs et critères de réussite	3
2	État de l'art et contexte scientifique	4
2.1	Formation, composition et évolution des MSP	4
2.2	Mesurer une population difficile d'accès	4
2.3	Question scientifique portée par COSMIC	5
3	Présentation et validation du système	5
3.1	Architecture d'ensemble	5
3.2	Mécanisme de collecte	6
3.3	Physique de la capture et supports scientifiques	11
3.4	Système embarqué et reconstruction du vol	20
3.5	Validation du système intégré	24
4	Conformité au programme REXUS	27
4.1	Enveloppe mécanique et ouverture en vol	27
4.2	Charges, vibration et environnement thermique	27
4.3	Interface électrique, RXSM et radio-silence	27
4.4	Sécurité fonctionnelle et comportement en défaut	28
4.5	Plan de conformité et Flight Requirements Plan	28
5	Après le vol : de l'échantillon au résultat	29
5.1	Récupération et chaîne de possession	29
5.2	Analyses morphologiques et chimiques	29
5.3	Attribution et niveau de preuve	30
5.4	Interprétation quantitative et incertitudes	31
5.5	Résultats attendus et valorisation	32
6	Conclusion	32
7	Exigences scientifiques et techniques	33
8	Grandeurs physiques et paramètres de modèle	34
9	Matrice de vérification et campagne d'essais	35
10	Séquence de mission et données à conserver	36
11	Chaîne d'analyse post-vol	37
12	Risques principaux et réduction de l'incertitude	38
13	Glossaire	38
	Bibliographie	39

1 Introduction

1.1 Pourquoi COSMIC ?

Il existe, à plusieurs dizaines de kilomètres au-dessus de nous, une région de l'atmosphère que l'on atteint rarement et dans laquelle se joue pourtant une partie discrète de l'histoire de la matière venue de l'espace.

Chaque jour, des météoroïdes pénètrent dans l'atmosphère terrestre à très grande vitesse. Les plus visibles produisent les météores observés depuis le sol ; une partie de leur matière suit un chemin plus discret. L'échauffement associé à l'entrée atmosphérique vaporise une fraction des constituants, puis les espèces métalliques et silicatées se transforment au contact de l'atmosphère. En se refroidissant, elles peuvent nucléer, coaguler et former des particules nanométriques, les *meteoric smoke particles* (MSP) [7, 4, 5].

La mésosphère concentre une partie de cette histoire physico-chimique. Sa position entre le domaine accessible aux ballons stratosphériques et les altitudes orbitales rend les prélèvements directs rares. Une fusée-sonde traverse au contraire cette région, emporte un instrument pendant quelques minutes et permet de récupérer la charge utile. REXUS offre ainsi la possibilité qui structure l'expérience : **prélever cette matière pendant la traversée de la haute atmosphère, la protéger jusqu'au retour au sol et relier son analyse aux conditions du vol.**

Une particule récupérée apporte plusieurs niveaux d'information. Sa morphologie, sa composition élémentaire, sa structure chimique et, lorsque la quantité de matière le permettra, sa signature isotopique renseignent sur son origine et sur les transformations subies dans l'atmosphère. Son interprétation dépend aussi de sa dynamique : taille, densité, vitesse relative et couplage au gaz déterminent sa trajectoire autour du véhicule et sa probabilité d'atteindre le collecteur. La même expérience relie donc matière météoritique, physique des particules en écoulement raréfié et développement d'une méthode de prélèvement réutilisable.

1.2 Principe de l'expérience

Le scénario de référence repose sur cinq étapes, représentées figure 1.1. Les surfaces restent confinées pendant le lancement et les premières phases de vol. Le collecteur s'ouvre au passage de 60 km en montée, reste exposé pendant la partie haute de la trajectoire, puis se referme au nouveau passage de 60 km en descente. Le module récupéré est transféré au laboratoire dans son état fermé. La durée exacte de l'exposition dépendra du profil attribué au vol et sera calculée à partir du *Flight Requirements Plan* (FRP), conformément au fonctionnement du programme REXUS [1].

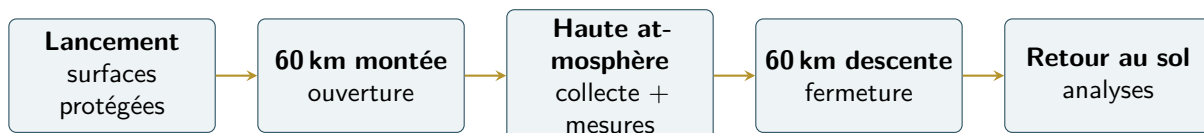


Figure 1.1 – Séquence scientifique de référence. Le seuil de 60 km définit aujourd'hui la fenêtre de conception ; les instants de commande seront recalés sur le profil de vol final.

La figure 1.1 montre que le collecteur, le mécanisme et l'électronique appartiennent à une même chaîne de mesure. Le mécanisme crée une exposition contrôlée ; le système embarqué enregistre l'état du tiroir, la pression, la température et la dynamique du véhicule ; les témoins de contamination accompagnent les supports ; le protocole post-vol conserve la chronologie et l'identité des échantillons. **Le résultat scientifique sera construit à partir de l'ensemble de ces informations : échantillon, position du collecteur et contexte de vol doivent rester indissociables.**

1.3 Objectifs et critères de réussite

L'expérience poursuit trois objectifs complémentaires. Le premier consiste à récupérer une population de particules compatible avec une origine météoritique et à caractériser sa morphologie et sa composition. Le deuxième consiste à relier cette population aux conditions de transport et de capture : le prélèvement apporte alors une contrainte expérimentale aux modèles de mouvement de particules nanométriques autour d'un véhicule suborbital. Le troisième consiste à démontrer une méthode de prélèvement protégée, traçable et récupérable, depuis le conditionnement avant vol jusqu'à l'analyse au laboratoire.

Le tableau 1.1 traduit ces objectifs en résultats observables. **Chaque critère de réussite est associé à une preuve identifiable, et pas seulement à une intention de conception.** Cette définition évite de réduire la

réussite au seul nombre de particules. Une collecte abondante possède une valeur scientifique limitée si la fenêtre d'exposition ou le fond de contamination restent inconnus ; une quantité plus modeste devient exploitable lorsque son histoire est documentée et que les méthodes d'analyse sont adaptées.

Table 1.1 – Critères de réussite de l'expérience.

Dimension	Résultat recherché	Preuve associée
Prélèvement	Supports exposés pendant une fenêtre connue puis récupérés protégés	Journal d'états, capteurs de position, inspection du module
Contexte physique	Conditions de vol suffisantes pour reconstruire l'exposition	Pression, température, IMU, chronologie REXUS
Échantillon	Population analysable avec témoins de fond	Cartographie des dépôts, témoins, chaîne de possession
Science	Caractérisation morphologique et chimique, avec interprétation des biais de capture	Microscopie, EDS, Raman/FTIR, modèle de transfert
Technologie	Ouverture, maintien et fermeture maîtrisés dans l'environnement REXUS	Calculs, FEA, essais fonctionnels, vibration et basse pression

Le SED suit cette logique de bout en bout. L'état de l'art précise la matière recherchée et la question scientifique. La présentation du système décrit ensuite le mécanisme, la physique de la capture, les supports et le système embarqué avec leurs résultats de dimensionnement. La conformité REXUS rassemble les contraintes du véhicule et les preuves prévues. Enfin, la partie post-vol décrit la transformation du prélèvement en résultat scientifique.

2 État de l'art et contexte scientifique

2.1 Formation, composition et évolution des MSP

Les MSP constituent l'une des formes prises par la matière météoritique après l'ablation atmosphérique. Les modèles décrivent une succession de processus : vaporisation lors de l'entrée, réactions d'oxydation, nucléation des espèces refroidies puis coagulation des noyaux formés [7, 4, 5]. Les tailles caractéristiques se situent dans le domaine nanométrique, avec une distribution qui dépend du temps de résidence, de la coagulation et du transport atmosphérique.

Les espèces contenant Fe, Mg, Si et O occupent une place majeure dans les compositions attendues. Des éléments tels que Na, Ni, Al, Ca ou K peuvent apparaître en proportions plus faibles. Les particules évoluent ensuite dans l'atmosphère : oxydation, hydratation, agrégation et interaction avec la glace modifient leur état chimique et physique [22, 23, 24, 25]. **Une analyse au laboratoire doit donc rechercher une convergence d'indices plutôt qu'une signature élémentaire unique.**

La distribution verticale et saisonnière ajoute une deuxième dimension. La circulation mésosphérique, la diffusion, la sédimentation et les processus associés aux nuages noctiluques redistribuent la matière au cours du temps [8, 9, 10, 11]. **Le prélèvement COSMIC doit être interprété comme un échantillon intégré sur une portion de trajectoire.** L'altitude, la vitesse et l'orientation du véhicule sont conservées dans le contexte de vol afin de relier le dépôt final à cette traversée.

2.2 Mesurer une population difficile d'accès

Les observations optiques, satellitaires et radar décrivent des populations de particules par leurs effets collectifs sur le rayonnement, le plasma ou les nuages mésosphériques. Elles fournissent des contraintes essentielles sur la distribution et les propriétés moyennes [11, 12]. Le retour d'échantillon ajoute un autre type d'information : un objet matériel peut être observé plusieurs fois, comparé à un témoin, cartographié chimiquement puis réanalysé avec une méthode plus spécifique.

Les précédentes expériences de prélèvement par fusée-sonde montrent en parallèle que le dispositif de collecte filtre la population ambiante. MAGIC, les travaux ayant conduit à MESS et d'autres concepts de sondage mésosphérique

ont mis en évidence le rôle de l'écoulement autour du véhicule et du couplage particule-gaz [13, 14, 15]. Une particule nanométrique peut suivre les lignes de courant et contourner une surface située directement dans sa direction géométrique ; un objet plus grand ou plus dense conserve davantage d'inertie. **La surface exposée doit donc être associée à une fonction de transfert entre la population atmosphérique et la population finalement récupérée.**

Cette fonction de transfert relie quatre étapes : présence dans l'atmosphère, interception par le collecteur, rétention sur le support et identification au laboratoire. La quantité observée après le vol dépend de la concentration ambiante n , de l'aire exposée A , de la vitesse relative v , de la durée t , de l'orientation et d'un rendement de capture η . Une écriture de premier ordre,

$$N \simeq \int n(t) A_{\text{eff}}(t) v_{\text{rel}}(t) \eta(t) dt,$$

sert de cadre à l'interprétation. Elle rappelle surtout que **la performance résulte d'une intégration sur la trajectoire, et non d'une valeur unique calculée à l'apogée.**

2.3 Question scientifique portée par COSMIC

La question centrale peut alors être formulée ainsi : **quelles propriétés physico-chimiques présente la matière météoritique récupérée pendant la traversée de la haute atmosphère, et quelle part de la population ambiante notre géométrie de prélèvement permet-elle réellement d'observer ?**

Cette formulation associe l'échantillon et sa dynamique. La composition, la structure et la morphologie décrivent la matière. Le nombre, la taille et la distribution des impacts apportent des contraintes sur son transport vers le collecteur. Les données de vol permettent enfin de calculer les régimes d'écoulement rencontrés et de tester les hypothèses du modèle de capture.

Le choix de REXUS découle directement de cette question. Le véhicule atteint typiquement entre 78 km et 93 km et sa charge utile est récupérée après le vol [2]. Le collecteur peut ainsi traverser une part importante de la mésosphère, s'exposer après la phase propulsée et ramener les supports au sol. La stratégie d'ouverture à 60 km en montée et de fermeture au même seuil en descente exploite l'ensemble de cette portion de trajectoire tout en maintenant les surfaces protégées pendant les phases plus basses et plus contaminantes.

Fil scientifique retenu

Le prélèvement constitue le fil conducteur de toute la démarche. Caractériser la matière recherchée permet d'identifier les propriétés qu'il faut préserver. Comprendre sa dynamique permet ensuite de déterminer quelles particules sont réellement susceptibles d'atteindre le collecteur. Enfin, analyser le processus de capture permet d'interpréter la nature de l'échantillon récupéré. Chimie, aérodynamique et mécanique répondent ainsi à une seule question expérimentale : **que prélève-t-on réellement, et dans quelles conditions ?**

3 Présentation et validation du système

3.1 Architecture d'ensemble

COSMIC est conçu comme une chaîne expérimentale continue. Le volume REXUS contient un carter de protection, un tiroir portant les supports scientifiques, un actionneur de translation, l'électronique de commande et les capteurs nécessaires à la reconstruction du vol. En position fermée, les surfaces sont isolées de l'environnement extérieur. En position ouverte, la géométrie du plateau devient une condition aux limites du modèle aérodynamique. Après fermeture, le même carter sert de première barrière de protection jusqu'au transfert au laboratoire.

Trois flux traversent le système. Le flux mécanique relie la structure REXUS au carter, au guidage et au tiroir. Le flux scientifique relie l'atmosphère aux supports, puis les supports aux analyses. Le flux d'information relie les capteurs, le calculateur et le journal de vol. **La cohérence du dispositif repose sur leurs interfaces** : une géométrie mécanique modifie l'aire effective de capture ; une variation d'épaisseur du support modifie l'intégration ; un capteur de position transforme un mouvement en durée d'exposition mesurable.

La configuration de référence est donc gérée comme un ensemble unique. La CAO utilisée pour la vérification d'enveloppe, la géométrie utilisée dans les simulations d'écoulement et la position utilisée pour cartographier les dépôts doivent correspondre à la même version. Toute modification importante - déplacement

d'un bord, variation de course, changement de cassette, batterie ou actionneur - entraîne une vérification ciblée des calculs et interfaces qu'elle affecte.

Principe d'intégration

Une fonction est considérée comme définie lorsqu'elle possède une grandeur mesurable, une interface identifiée et une méthode de vérification. Cette règle permet de passer du schéma de principe au système de vol sans créer de rupture entre mécanique, collecte et données.

3.2 Mécanisme de collecte

3.2.1 Architecture et cinématique

La figure 3.1 présente l'architecture mécanique retenue. Un plateau mobile est guidé radialement dans un carter fixé à la structure REXUS. Une transmission vis-écrou transforme la rotation de l'actionneur en translation. Le même mouvement assure le déploiement pour la collecte puis le retour vers la position fermée. **Ce choix concentre les fonctions critiques sur un seul degré de liberté** et simplifie à la fois le guidage, la mesure de position et la fermeture.

La sélection de cette architecture résulte d'une comparaison avec plusieurs solutions : vérin pneumatique, bras articulé, tiroirs multiples, pignon-crémaillère et poulie-courroie. La translation par vis-écrou a été retenue pour sa rigidité, son auto-maintien possible, la maîtrise d'un effort axial de fermeture et la réduction du nombre de mécanismes mobiles. Le tableau 3.1 rassemble les valeurs actuellement utilisées pour le dimensionnement. **Il constitue la référence numérique du mécanisme dans cette version du SED.** Elles définissent une configuration de travail cohérente ; les références COTS et la nomenclature finale seront gelées avant la CDR.

Table 3.1 – Grandeurs de référence du mécanisme dans la configuration actuelle.

Grandeur	Valeur actuelle	Rôle dans le dimensionnement
Course utile du tiroir	164 mm	Déployer entièrement la zone de collecte hors du carter
Pas/avance de la transmission	3 mm/tour	Lier rotation, position et durée de déplacement
Temps cible d'un mouvement	≈ 4 s	Limiter la perte de temps sur la fenêtre scientifique
Tension de l'actionneur	24–48 V	Domaine de fonctionnement du système d'entraînement étudié
Poussée de dimensionnement	≈ 250 N	Vaincre frottements, compression des joints et marges mécaniques
Déport maximal calculé de la trappe	≈ 0,2 mm	À comparer au critère géométrique REXUS de 0,5 mm vers l'intérieur
Diamètre du module	355,6 mm	Enveloppe standard REXUS de 14 pouces
Hauteur nominale étudiée	220 mm	Configuration mécanique de référence

La fonction mécanique ne peut pas être résumée à « sortir un plateau ». Elle doit garantir trois états scientifiques distincts : un état protégé avant l'exposition, un état ouvert dont la géométrie est suffisamment connue pour être modélisée, puis un nouvel état protégé après la collecte. Le mécanisme doit exécuter cette séquence alors que la fusée subit des accélérations, des vibrations, une rotation, une forte variation de pression et un environnement thermique variable. Il ne doit pas non plus créer un risque pour le véhicule ou les expériences voisines.

Le principe retenu est celui d'un tiroir unique en translation. Le plateau de collecte est contenu dans un carter fermé pendant la phase propulsée. Lors de l'ouverture, une vis transforme la rotation du moteur en translation et pousse le plateau jusqu'à sa position d'exposition. Lors de la fermeture, le même axe ramène le plateau dans le carter et applique l'effort nécessaire sur la ligne d'étanchéité. Cette cinématique réduit le nombre de degrés de liberté et rend l'état du mécanisme plus facile à mesurer qu'avec une architecture articulée complexe.

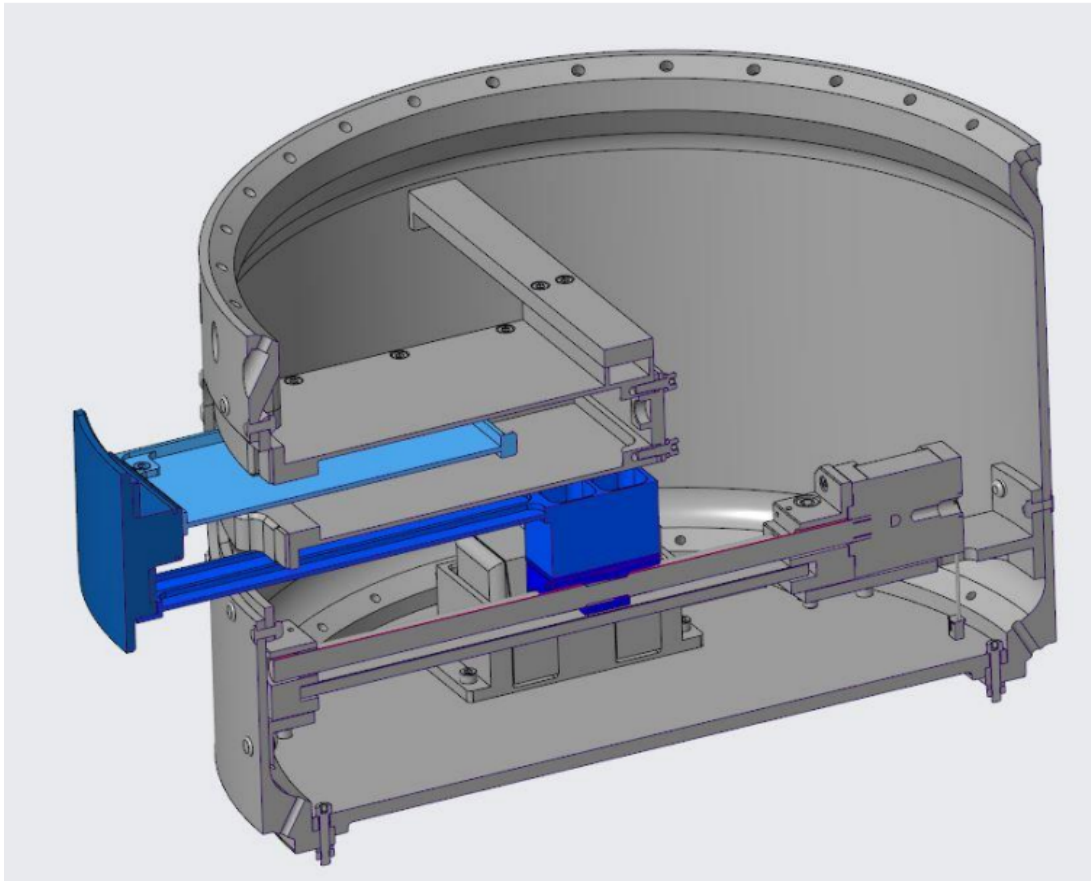


Figure 3.1 – Vue d’ensemble de l’intégration du collecteur dans le volume du module. La géométrie est conçue pour relier directement le déplacement du plateau à la fenêtre d’exposition.

La lecture de la figure 3.1 se fait de droite à gauche le long de l’axe de translation : l’actionneur et la transmission restent à l’intérieur du module, tandis que le plateau mobile traverse la paroi et vient exposer la surface scientifique à l’extérieur. **L’information importante est la continuité mécanique entre l’actionneur, le guidage, le plateau et la trappe : une seule course commande à la fois l’exposition et le retour en position protégée.** Cette vue sert également à repérer les volumes qui doivent rester libres pendant toute la course et les interfaces dont la position devra être identique dans la CAO, la CFD et les essais.

Plusieurs architectures ont été considérées au début de la conception : vérin pneumatique, bras articulé, tiroirs multiples, pignon-crémaillère, poulie-courroie et translation par vis-écrou. Le choix du tiroir unique ne vient pas d’une préférence mécanique isolée. **Il répond à la nécessité de réduire simultanément la masse, le nombre d’actionneurs, les chemins de fuite, les jeux cinématiques et les modes de panne.** Une translation guidée permet également de conserver une géométrie reproductible pour la CFD et pour la cartographie post-vol.

3.2.2 Fermeture, étanchéité et sécurité passive

La collecte est un objectif scientifique ; **la fermeture est une condition de survie de l’échantillon et de sécurité du véhicule.** Un mécanisme qui resterait bloqué ouvert après la phase scientifique exposerait les supports à l’atmosphère plus dense de la descente et pourrait compromettre l’intégrité de la trappe. Le système est donc conçu avec une logique asymétrique : une panne empêchant l’ouverture peut conduire à un vol sans prélèvement, mais une panne empêchant la fermeture doit être rendue aussi improbable que possible.

La transmission vis-écrou présente ici un intérêt. Selon le pas et le choix exact du mécanisme, elle peut offrir une résistance au retour mécanique et maintenir la position sans alimentation continue. Elle fournit aussi un effort axial utile pour comprimer les joints lors de la fermeture. Cette propriété ne dispense pas de vérifier expérimentalement le comportement sous vibration et sous gradients thermiques ; elle fournit une base de conception favorable à un état fermé passivement stable.

L’étanchéité recherchée n’est pas nécessairement celle d’une enceinte sous vide parfaite. Le besoin scientifique est d’empêcher un échange non contrôlé de particules et de limiter l’entrée de contaminants lorsque les supports doivent être protégés. La ligne de joint, les jeux de guidage, les traversées de câbles et la trappe doivent donc être étudiés ensemble. La qualification devra mesurer non seulement une fuite de gaz éventuelle, mais aussi la contamination particulière introduite lors de cycles réalistes d’ouverture et de fermeture.

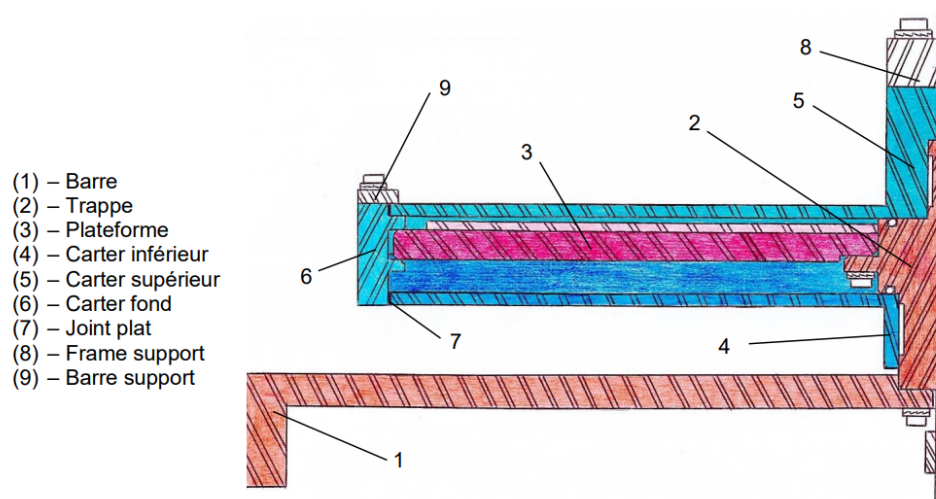


Figure 3.2 – Coupe du système de prélèvement montrant le plateau, le carter et la fermeture. La ligne d'étanchéité et les jeux fonctionnels seront figés après essais sur prototype.

La coupe de la figure 3.2 permet de suivre la continuité entre le guidage, le plateau mobile et la ligne de joint. La plateforme scientifique (3) se déplace à l'intérieur du carter inférieur et supérieur (4–5), tandis que la trappe (2) vient fermer l'ouverture au retour du tiroir. Les joints (7) matérialisent la barrière entre l'environnement extérieur et le volume contenant les supports. **Cette figure montre donc où une erreur de jeu, d'alignement ou de compression du joint peut simultanément provoquer un blocage mécanique et dégrader la propreté de l'échantillon.** Elle sert de référence pour le calcul des tolérances et pour la préparation des essais de fermeture.

Le choix de la transmission sera consolidé par un bilan de couple. La force axiale nécessaire combine le frottement des guidages, la compression des joints, les inerties du plateau et une marge pour les variations thermiques. À partir du pas de vis et de son rendement, cette force est convertie en couple moteur. Le dimensionnement ne cherchera pas un moteur « le plus puissant possible » : un couple très élevé augmente le courant, la masse et l'énergie dissipée. La bonne valeur est celle qui garantit une marge suffisante sur le pire cas de mouvement sans surdimensionnement inutile.

Le profil de vitesse du tiroir sera également limité. Une accélération trop brusque peut augmenter les efforts sur les fixations et générer des vibrations dans la charge utile. Une commande progressive du moteur permet de réduire ce choc mécanique tout en conservant un temps d'ouverture compatible avec la fenêtre scientifique. Le temps de mouvement mesuré deviendra une grandeur de mission : il sera soustrait de la durée brute entre le déclenchement et la confirmation de position pour obtenir le temps d'exposition réel.

La trappe et le plateau doivent en outre conserver une géométrie compatible avec l'aérodynamique. Lorsque le collecteur est ouvert, les structures exposées créent leur propre sillage. Leur forme est donc un compromis entre rigidité, surface de capture et perturbation de l'écoulement. Une modification de quelques millimètres de l'épaisseur d'un bord peut être négligeable mécaniquement mais importante pour les trajectoires de particules. C'est pourquoi la CAO utilisée par la mécanique et la géométrie utilisée par la CFD seront issues du même modèle de référence.

Le chemin des câbles est traité avec la même logique. Un câble qui traverse une zone de glissement sans guidage peut augmenter le frottement ou se pincer lors de la fermeture. Un passage mal placé peut également rompre une barrière de propreté. Les faisceaux seront donc contraints, fixés et testés sur l'amplitude complète du mouvement. Les connecteurs seront positionnés de manière à permettre l'intégration sans devoir rouvrir la zone scientifique après conditionnement.

L'accès de maintenance sera limité mais prévu. Avant le vol, il doit être possible de vérifier un capteur, un connecteur ou une fixation sans exposer inutilement les supports. Cette exigence semble opérationnelle, mais elle a un effet direct sur la contamination. Une architecture qui oblige à démonter la zone propre pour chaque intervention serait difficile à maîtriser pendant une campagne où le temps est limité.

Le bilan mécanique final regroupera donc bien plus que des contraintes maximales : enveloppe, masse, centre de gravité, rigidité, couple, temps de mouvement, réaction sur le véhicule, étanchéité, accès et propreté. Cette vision intégrée évite que le mécanisme soit « validé » sur un critère tout en dégradant la science sur un autre.

3.2.3 Chaîne d'efforts, guidage et tolérances

La simplicité apparente d'un tiroir cache une exigence essentielle : le plateau doit retrouver des positions mécaniques répétables avant et après une séquence dynamique sévère. L'ouverture scientifique

n'a de valeur que si la géométrie utilisée dans les calculs correspond à la géométrie réelle ; la fermeture n'a de valeur que si le joint est suffisamment comprimé pour protéger les supports. Le dimensionnement mécanique relie donc directement rigidité, guidage, effort d'actionnement et étanchéité.

Les charges de lancement sont transmises depuis la structure REXUS vers les points de fixation, puis vers le carter et les éléments mobiles. La première vérification consiste à identifier cette chaîne d'efforts et à éviter qu'un composant destiné au positionnement fin ne reprenne seul une charge structurale importante. Le carter fournit le chemin principal de reprise des efforts ; les guidages maintiennent la translation ; la vis fournit l'effort axial nécessaire au mouvement et à la mise en appui. Cette séparation des fonctions permet d'interpréter correctement une simulation par éléments finis : une contrainte locale n'est pertinente que si les appuis et les charges représentent le chemin mécanique réel.

Les premières simulations ont été utilisées de cette façon, comme outils de conception et non comme certificats de qualification. Elles permettent de repérer les concentrations de contrainte, de comparer une géométrie avant et après renfort et d'estimer les marges sur les pièces critiques. Les résultats disponibles indiquent des coefficients de sécurité supérieurs à deux sur plusieurs éléments dans les cas étudiés, mais ces valeurs resteront attachées à la configuration CAO, aux matériaux et aux chargements qui les ont produits. Une modification de fixation, de masse mobile ou de motorisation impose donc de vérifier que le cas de charge reste représentatif avant de réutiliser une marge.

Le guidage est traité avec la même prudence. Un mécanisme peut être suffisamment résistant et malgré tout se bloquer si les défauts d'alignement, la dilatation différentielle ou les déformations sous charge consomment le jeu fonctionnel. Les tolérances ne seront donc pas définies seulement à partir de la fabrication nominale. Elles doivent intégrer la dispersion des pièces, le montage, les variations thermiques, le déplacement élastique sous charge et l'état du mécanisme après vibration. Les essais de cycles, de basse température et de basse pression serviront à vérifier qu'une marge de mouvement demeure dans les combinaisons défavorables.

La transmission vis-écrou présente ici un intérêt particulier : elle transforme la rotation du moteur en déplacement axial avec une relation mesurable entre nombre de tours et position. Cette relation donne un moyen supplémentaire de surveiller le déplacement en plus des capteurs de fin de course. Elle permet aussi d'appliquer un effort de fermeture contrôlé. Nous ne considérons toutefois pas le pas de vis comme une garantie suffisante à lui seul : la résistance au retour, le jeu, le rendement de transmission et le comportement sous vibration seront mesurés sur la configuration réelle.

3.2.4 Fermer signifie aussi créer une barrière propre

La position « fermée » a deux significations simultanées. Mécaniquement, elle doit empêcher tout déplacement dangereux pendant les phases non scientifiques. Scientifiquement, elle doit réduire l'échange de particules entre le compartiment de collecte et l'extérieur. Le joint se situe donc à l'interface de la sûreté et de la contamination. Sa géométrie, son écrasement, son matériau et l'état des surfaces d'appui seront spécifiés avec cette double fonction en tête.

Nous ne chercherons pas à démontrer une herméticité absolue au sens d'un réservoir sous vide si la science ne l'exige pas. L'exigence pertinente est une protection particulière suffisamment efficace et reproductible pour que le fond des témoins reste inférieur au signal que l'on cherche à interpréter. Cette exigence peut être testée par exposition contrôlée à un aérosol traceur ou à un environnement particulière connu, avant et après cycles mécaniques. Elle est plus proche du besoin scientifique qu'une simple affirmation d'étanchéité.

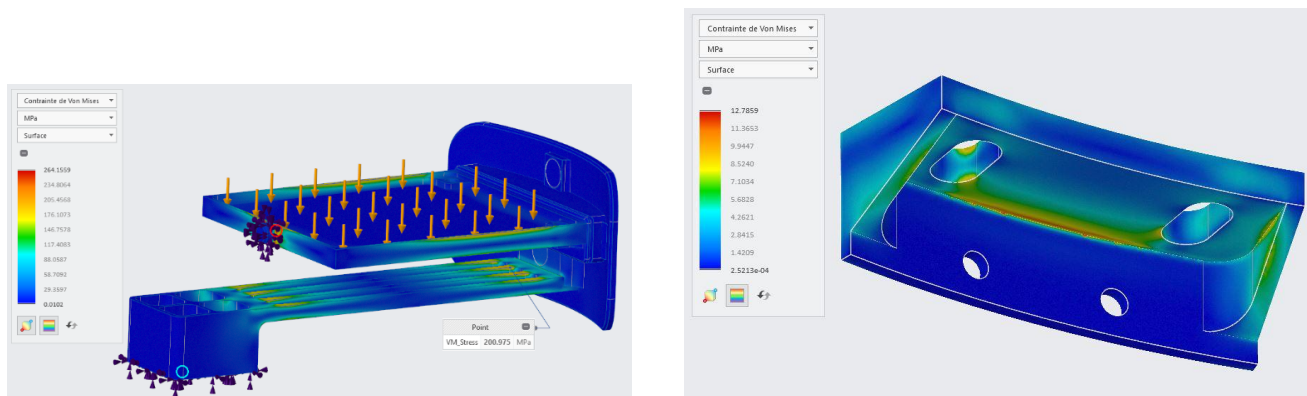
Enfin, la fermeture doit rester prioritaire lorsque les ressources deviennent limitées. La marge de couple du moteur sera donc évaluée sur le cas le plus défavorable de retour, avec frottements, température et désalignement représentatifs. La commande devra arrêter le mouvement si un effort anormal est détecté ou si la durée dépasse une limite raisonnable, tout en évitant les tentatives répétées susceptibles d'endommager le mécanisme. Cette stratégie rejoint la logique générale du projet : mieux vaut conserver un échantillon plus petit mais traçable qu'augmenter l'exposition au prix d'un risque de non-fermeture.

3.2.5 Résultats structuraux

Le manuel REXUS donne des accélérations longitudinales typiques pouvant atteindre 20 g pendant la propulsion et des décélérations de même ordre pendant la rentrée [1]. À cela s'ajoutent la rotation du véhicule et les vibrations. Le mécanisme mobile doit donc être dimensionné dans son état le plus défavorable, en particulier lorsque le plateau et la trappe créent un porte-à-faux ou lorsque les efforts sont repris par un nombre limité de points de fixation.

Les premières analyses par éléments finis ont servi à identifier les zones de concentration de contraintes. **Une modification de la reprise mécanique a notamment permis de redistribuer le moment de flexion dans la barre de poussée.** Les résultats disponibles donnent des facteurs de sécurité supérieurs à deux sur les

pièces principales pour les cas de charge étudiés. Ces valeurs restent des résultats de conception : elles devront être recalculées lorsque la géométrie, les matériaux, les liaisons et les cas de charge seront gelés, puis confrontées aux essais de vibration.



(a) Barre de poussée.

(b) Carter principal.

Figure 3.3 – Exemples d’analyses structurales utilisées pour localiser les contraintes et guider les évolutions de géométrie. Les facteurs de sécurité finaux seront établis sur la configuration gelée.

Les cartes de la figure 3.3 ne sont pas seulement des illustrations de contraintes. Les couleurs permettent de repérer les zones où la contrainte de Von Mises se concentre et donc les endroits où une modification de géométrie ou de reprise d’effort est la plus efficace. Sur la barre de poussée, la zone critique se situe près de la reprise de charge ; le carter est étudié de la même manière pour vérifier que la structure qui guide et ferme le tiroir conserve sa rigidité. **La décision de renforcer la barre provient directement de cette lecture des cartes, puis se vérifie par la baisse de la contrainte maximale présentée dans le tableau 3.2.**

L’aluminium 7075-T6 est envisagé pour plusieurs éléments structuraux en raison de sa résistance mécanique spécifique. Le plateau, dont la géométrie comporte des logements et des formes complexes, peut être réalisé en AlSi10Mg par fabrication additive. Le choix final des procédés doit toutefois intégrer la propreté : une surface mécanique proche des échantillons ne sera pas jugée uniquement sur sa résistance, mais aussi sur sa capacité à être nettoyée, caractérisée et manipulée sans générer de particules parasites.

La simulation a également servi à corriger une faiblesse de conception. Dans la première géométrie, la barre de poussée ne disposait que d’un point principal de maintien et la contrainte équivalente de Von Mises atteignait environ 497 MPa sous le cas de charge à 20g. L’ajout d’un second point de support redistribue le moment de flexion et ramène la contrainte maximale à environ 201 MPa. Le tableau 3.2 présente les résultats de la configuration corrigée.

Table 3.2 – Résultats structuraux préliminaires de la configuration corrigée sous le cas de charge étudié à 20g.

Composant	Matériau	$\sigma_{\max}$	Marge R_e/σ	Lecture
Barre de poussée	Al 7075-T6	201 MPa	2,51	Renfort conservé
Carter principal	Al 7075-T6	142 MPa	3,55	Marge structurelle
Plateau de collecte	AlSi10Mg	78 MPa	2,95	Compatible avec le cas simulé
Vis de translation	Inox A2	115 MPa	3,91	Marge structurelle
Supports moteur/trappe	Al 7075-T6	165 MPa	3,06	Marge structurelle

Ces facteurs de sécurité restent associés au modèle numérique actuel : géométrie, conditions aux limites, masses et matériaux doivent être identiques à la configuration de vol pour que la comparaison reste valable. **La vérification finale combinera recalcul FEA, contrôle des déformations, essais vibratoires et inspection fonctionnelle après essai.**

3.2.6 Masse et intégration

Le budget de masse présente actuellement deux totaux issus de deux niveaux de nomenclature : 9,272 kg pour la somme détaillée disponible et 9,543 kg pour l’enveloppe conservatrice utilisée dans le dimensionnement. Le SED retient 9,543 kg comme valeur de travail jusqu’à la réconciliation complète entre CAO, nomenclature, câblage, batteries, visserie et supports scientifiques. Cette manière de traiter

l'écart évite de créer une fausse précision et maintient une marge visible vis-à-vis de l'allocation interne de 10 kg, allocation qui devra elle-même être confirmée dans la configuration REXUS attribuée.

La masse est traitée comme un budget vivant lié à la nomenclature et à la CAO. L'estimation conservatrice actuelle est proche de 9,5 kg, mais elle doit être reconstruite à partir d'une nomenclature unique avant toute revue de conception. Le budget de masse poursuit deux objectifs : respecter l'allocation applicable et réduire la masse globale du véhicule. Cette réduction crée une marge pour les évolutions tardives, les câbles, la visserie, les protections ou les supports qui sont souvent sous-estimés dans les premières versions.

Le centre de gravité du module doit rester aussi proche que possible de l'axe longitudinal de la fusée. L'agencement interne cherche donc à répartir l'actionneur, les alimentations et l'électronique sans créer un déséquilibre radial excessif. Les propriétés de masse finales – masse totale, centre de gravité et moments d'inertie – seront mesurées sur l'expérience assemblée conformément aux attentes REXUS [1]. Les valeurs issues de CAO restent utiles pour concevoir, mais elles ne remplacent pas la mesure du matériel de vol.

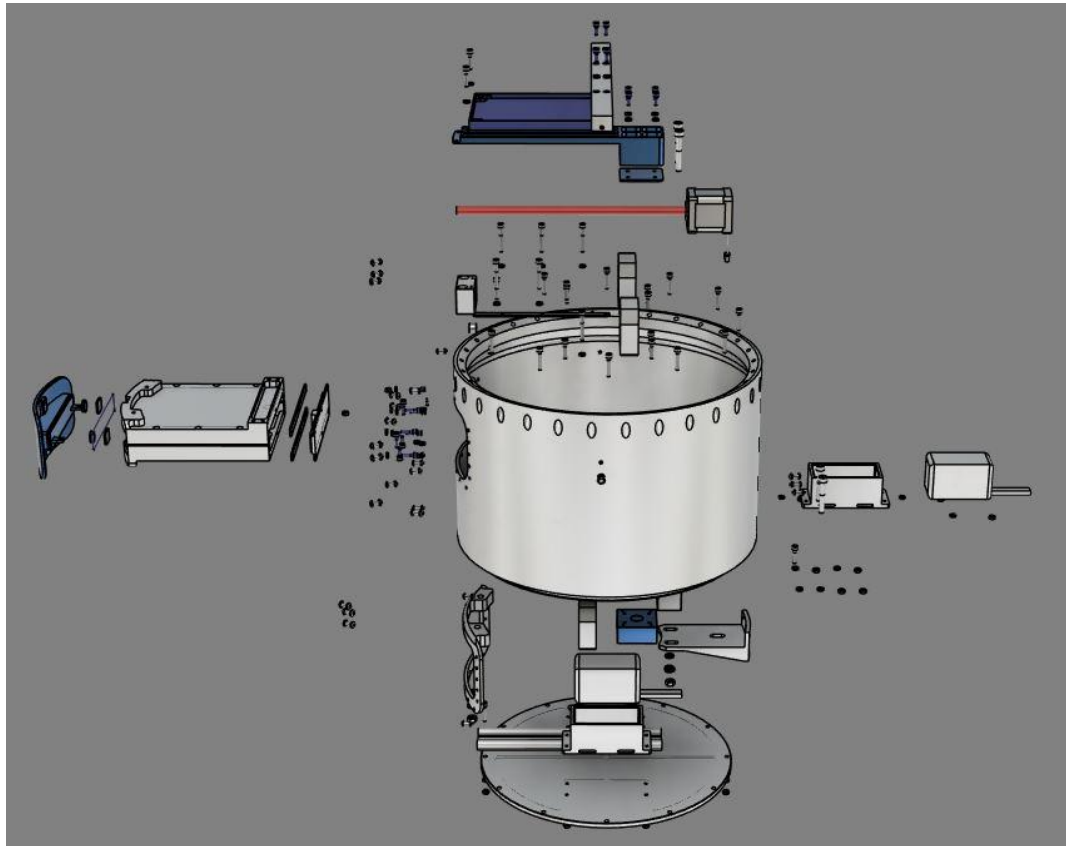


Figure 3.4 – Vue éclatée du module. L'intégration mécanique, le passage des câbles et l'accès aux éléments de maintenance sont étudiés sur une même configuration afin d'éviter des interfaces définies séparément.

La vue éclatée de la figure 3.4 montre comment les sous-ensembles s'empilent réellement dans le volume disponible : structure, entraînement, carter, plateau, alimentation et électronique ne peuvent pas être dimensionnés indépendamment. Elle sert à vérifier le chemin des câbles, l'accès aux éléments de maintenance et la séparation entre zone mécanique et zone scientifique. **Une interférence visible sur cette vue est traitée comme une incompatibilité système, même si chaque pièce prise séparément respecte son propre dimensionnement.**

3.3 Physique de la capture et supports scientifiques

3.3.1 De l'écoulement à la particule interceptée

La performance du collecteur dépend d'abord de la trajectoire des particules avant l'impact. La surface géométrique disponible fixe une capacité d'interception maximale, tandis que l'écoulement autour du véhicule détermine la fraction de cette surface effectivement alimentée en particules. La modélisation associe donc le profil de vol, l'atmosphère, la géométrie du module et le couplage particule-gaz.

La fenêtre entre les deux passages à 60 km traverse plusieurs régimes. Un calcul analytique préliminaire fondé sur NRLMSISE-00 et un profil REXUS de référence donne, près de 61 km, des pressions de l'ordre de 15 Pa et un nombre de Mach voisin de 2 dans les points étudiés ; vers 82 km, le même modèle conduit à une pression

proche de 0,8 Pa et à un régime beaucoup plus lent. Ces valeurs servent de scénarios de dimensionnement et seront remplacées par le profil du vol attribué. Elles montrent surtout que la collecte doit être intégrée sur une trajectoire et non évaluée à partir d'un unique « état d'apogée ».

Le nombre de particules interceptées est écrit sous la forme

$$N = \int n(t) A_{\text{eff}}(t) v_{\text{rel}}(t) \eta(t) dt,$$

où n représente la concentration ambiante, A_{eff} l'aire effectivement alimentée par l'écoulement, v_{rel} la vitesse relative et η le rendement regroupant les étapes de transfert et de rétention. Cette formulation est utilisée pour les études de sensibilité; elle évite de transformer une concentration atmosphérique incertaine en prédiction artificiellement précise du nombre collecté.

3.3.2 Régime raréfié

À basse altitude et à l'échelle d'un objet macroscopique, l'air peut souvent être traité comme un continu. Lorsque la densité diminue, le libre parcours moyen des molécules devient comparable aux dimensions caractéristiques du système. Le nombre de Knudsen

$$Kn = \frac{\lambda}{L}$$

compare le libre parcours moyen λ à une longueur caractéristique L . Lorsque Kn augmente, l'hypothèse de continuum devient progressivement moins précise et les conditions de glissement, puis des méthodes cinétiques, deviennent pertinentes [29]. **Le choix du modèle doit donc dépendre de l'altitude et de l'échelle étudiée :** l'écoulement global autour du module et la force exercée sur une particule nanométrique ne nécessitent pas toujours le même niveau de description.

Pour une très petite particule, le régime de traînée peut s'écarter de la loi de Stokes classique. Dans le domaine de type Epstein, le temps de relaxation particulaire dépend notamment de la densité du solide, de son rayon et de la densité du gaz. Ce temps peut être comparé à un temps caractéristique de l'écoulement pour construire un nombre de Stokes effectif. Lorsque ce nombre est très inférieur à l'unité, la particule s'ajuste rapidement au mouvement du gaz et suit davantage les lignes de courant. Lorsqu'il devient plus grand, l'inertie de la particule lui permet de s'en écarter plus facilement [15].

Cette distinction est centrale pour COSMIC. Une MSP nue de quelques nanomètres peut être fortement déviée par l'écoulement autour de la fusée et ne jamais toucher une surface pourtant placée face au mouvement du véhicule. Une particule plus grande, un agrégat ou une particule recouverte de glace aura une dynamique différente. L'expérience ne doit donc pas être conçue pour une seule taille « typique », mais pour une distribution de tailles et de propriétés.

Le calcul le long de la trajectoire sera mis en œuvre par pas temporels suffisamment fins pour suivre les variations rapides autour des événements d'ouverture et de fermeture. À chaque pas, le profil atmosphérique fournit une estimation de p , T et ρ_g . La vitesse du son $a = \sqrt{\gamma RT}$ donne le nombre de Mach, tandis qu'une estimation du libre parcours moyen permet d'évaluer le nombre de Knudsen à l'échelle du module. Cette première passe permet d'identifier les intervalles où un modèle compressible classique est pertinent et ceux où des corrections de raréfaction deviennent importantes.

Pour les portions supersoniques, les relations de choc fournissent un contrôle analytique utile. Elles permettent d'estimer l'ordre de grandeur de la pression et de la température après compression sans prétendre décrire toute la géométrie tridimensionnelle. Ces valeurs servent ensuite de référence pour juger la cohérence des simulations numériques. Une CFD qui prédirait une pression de stagnation incompatible de plusieurs ordres de grandeur avec l'analyse simple serait considérée comme suspecte avant toute interprétation des trajectoires de particules.

La dynamique particulaire sera étudiée en injectant des particules virtuelles en amont du module, avec une distribution de positions initiales couvrant une surface plus large que le plateau. Leur rayon sera balayé sur plusieurs ordres de grandeur, depuis le domaine nanométrique jusqu'à des agrégats ou fragments plus grands. La densité sera également variée afin de représenter différents matériaux possibles. Pour chaque cas, le code enregistrera si la particule contourne le module, touche une structure, atteint le support, avec quelle vitesse et sous quel angle.

Le résultat pourra être représenté par une « carte d'admission » : pour une classe de particules donnée, chaque position initiale est associée à une issue. Cette représentation est plus informative qu'un rendement global car elle montre l'effet des bords, de la trappe et du carter. En intégrant cette carte sur une distribution de particules, on obtient ensuite une efficacité d'interception utilisable dans le modèle de nombre collecté.

La sensibilité à la rotation sera traitée en calculant plusieurs orientations du module par rapport au vent relatif. Si les résultats varient peu, une moyenne simple pourra être utilisée. S'ils varient fortement, l'intégration devra

prendre en compte la fréquence de rotation et la phase pendant la fenêtre de collecte. Cette approche permet d'éviter d'introduire une dépendance complexe tant qu'elle n'est pas démontrée par le modèle.

Enfin, la vitesse d'impact obtenue par les trajectoires sera transmise au modèle de matériau. Le couplage entre aérodynamique et capture ne s'arrête donc pas à la probabilité de toucher le plateau. Une même particule peut être capturée proprement à une vitesse et fragmentée à une autre. L'objectif final est d'obtenir pour chaque classe une chaîne complète : probabilité d'atteindre la surface, distribution de vitesse d'impact, probabilité de rétention et possibilité d'analyse.

3.3.3 Écoulement autour du module

Le premier niveau de modélisation repose sur le profil de vol et un modèle atmosphérique. À chaque altitude, la densité, la pression, la température et la vitesse du son permettent d'estimer le nombre de Mach et les grandeurs de stagnation. Dans la partie basse de la fenêtre, le véhicule peut rencontrer un régime compressible marqué. Une onde de choc ou une zone de forte compression modifie alors la trajectoire du gaz avant qu'il n'atteigne le collecteur. À proximité de la paroi, la couche limite et les zones de recirculation peuvent encore réduire ou déplacer le flux de particules.

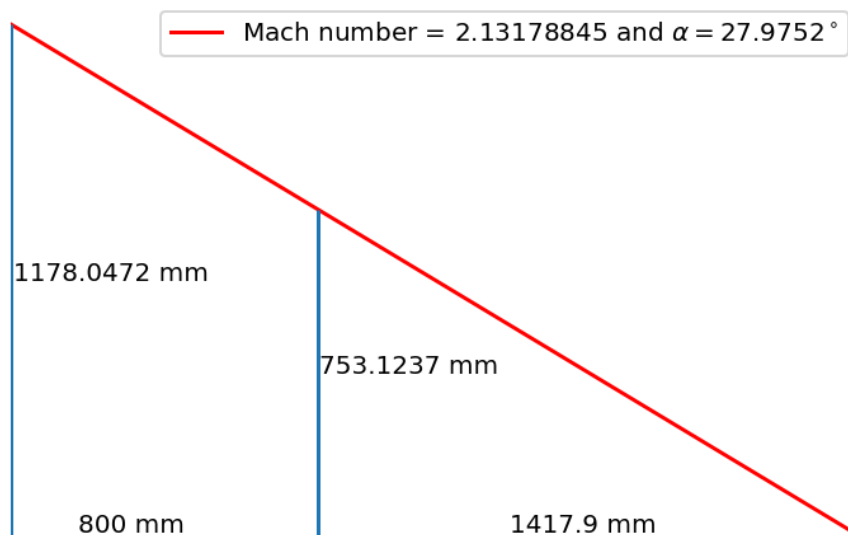


Figure 3.5 – Géométrie de travail utilisée pour étudier l'influence des structures compressibles et de l'orientation du module sur l'alimentation du collecteur.

La figure 3.5 se lit comme une construction géométrique préliminaire. La ligne rouge représente la position estimée d'une onde de choc oblique pour le cas étudié, ici à un nombre de Mach voisin de 2,13 et pour l'angle calculé dans ce modèle. Les segments verts donnent les distances longitudinales utilisées dans la construction et les segments bleus la hauteur de l'onde par rapport à la ligne de référence à deux positions. **Cette construction détermine si la zone du collecteur peut se trouver dans un écoulement déjà fortement dévié ou comprimé ; le nombre de particules sera calculé ensuite à partir des trajectoires.** Si c'est le cas, la vitesse et la direction du gaz arrivant sur la surface ne sont plus celles du vent incident ; la trajectoire des particules doit donc être recalculée dans ce champ modifié. Cette construction sert à sélectionner les cas à approfondir, puis la CFD reprend la géométrie complète.

L'analyse numérique complète ce raisonnement. Les premières simulations CFD ont pour objectif d'identifier les zones de vitesse élevée, les gradients de pression et les recirculations autour de la géométrie. Elles ne sont pas encore utilisées comme une « validation » de la capture : une simulation de fluide stationnaire ou bidimensionnelle, même convergée numériquement, ne reproduit pas nécessairement le vol réel. Elle sert d'abord à repérer les mécanismes dominants et à choisir les cas qui devront être raffinés.

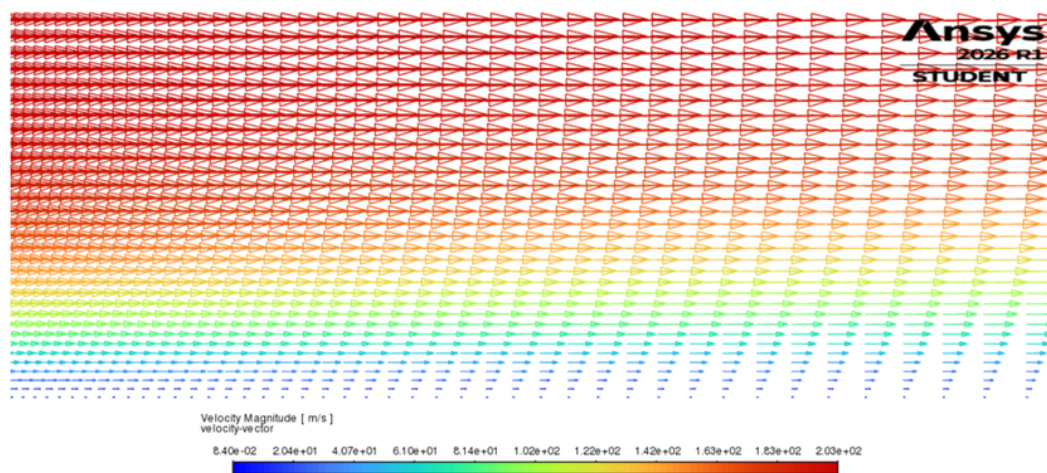


Figure 3.6 – Exemple de champ de vitesse issu d’une première étude numérique. L’intérêt principal est d’identifier la déviation du flux et les zones où les trajectoires de particules devront être calculées explicitement.

Le champ de vitesse de la figure 3.6 complète la construction précédente. Les variations de couleur traduisent les différences de vitesse dans le domaine ; les zones où le flux ralentit, se dévie ou recircule sont précisément celles où une particule très couplée au gaz peut être entraînée loin de la surface. **Ce que nous cherchons dans cette figure est donc le chemin réel du fluide vers le plateau, pas uniquement la valeur maximale de vitesse.** Ces structures deviennent ensuite les conditions d’entrée du calcul de trajectoires particulières.

La suite logique est un calcul couplé au moins à sens unique : l’écoulement du gaz est calculé, puis des particules de tailles et densités différentes sont injectées et suivies jusqu’au module. Compte tenu de leur très faible chargement massique, les MSP ne sont pas supposées modifier de manière mesurable l’écoulement global autour de la fusée ; c’est principalement le fluide qui contrôle leur mouvement. L’intérêt physique réside donc dans la réponse des particules au champ d’écoulement et dans la probabilité d’impact sur les différentes zones du collecteur.

La stratégie numérique est volontairement hiérarchisée afin d’éviter deux excès : utiliser un modèle trop simple là où il devient faux, ou lancer immédiatement un calcul très coûteux sans savoir quelles grandeurs sont réellement sensibles. Le premier niveau reconstruit l’atmosphère et le nombre de Mach le long de la trajectoire. Le deuxième calcule l’écoulement autour d’une géométrie simplifiée pour localiser les zones de compression, de séparation et de recirculation. Le troisième introduit la géométrie du collecteur ouvert. Le quatrième ajoute les trajectoires de particules pour une grille de tailles et de densités.

À chaque niveau, un contrôle de cohérence est prévu. Les pressions de stagnation et tendances de vitesse obtenues numériquement seront comparées aux relations analytiques lorsque celles-ci sont applicables. Une étude de sensibilité au maillage permettra de vérifier qu’une zone de recirculation n’est pas un artefact numérique. Les conditions limites seront choisies à partir du profil atmosphérique et non d’une vitesse arbitraire unique. Enfin, les calculs de particules seront répétés lorsque le champ de fluide change suffisamment avec l’altitude pour modifier la fonction de capture.

Le régime raréfié constitue la limite la plus délicate de cette stratégie. Lorsque le nombre de Knudsen devient trop élevé pour une CFD classique, plusieurs options sont possibles : conditions de glissement, corrections de traînée, ou méthodes cinétiques comme la DSMC. Le niveau réellement nécessaire sera choisi à partir du rapport entre coût numérique et influence sur la prédiction de capture. Si une correction de traînée suffit à changer de manière négligeable la zone d’impact, une simulation cinétique complète n’apporterait pas de valeur proportionnelle. Si, au contraire, le modèle continuum prédit une frontière de capture très sensible, une méthode plus adaptée sera justifiée.

La représentation finale privilégiera donc une **fonction de transfert exploitable** plutôt qu’une visualisation sans lien direct avec la mesure. Pour chaque classe de particules, on cherchera une probabilité d’atteindre le plateau, une distribution de vitesse d’impact et une carte spatiale. Ces trois résultats alimentent directement trois décisions différentes : dimensionner la surface, choisir le matériau de capture et organiser la cartographie post-vol. Ils constituent aussi la base du budget d’incertitude présenté plus loin.

3.3.4 Mouvement des particules

Pour comprendre pourquoi certaines particules atteignent le plateau et d’autres non, il faut séparer deux questions. La première décrit l’écoulement du gaz autour du module ; la seconde décrit la manière dont une particule répond à cet écoulement. Une particule n’est ni parfaitement solidaire du gaz ni totalement balistique. Son comportement dépend d’un temps de réponse : lorsque le gaz change de vitesse ou de direction, la particule

met un certain temps à s'ajuster. Ce temps augmente avec son inertie et diminue lorsque le couplage avec le gaz devient plus efficace. Dans la haute atmosphère, la raréfaction modifie ce couplage et impose de raisonner avec des modèles adaptés aux collisions molécule-particule [29].

L'idée peut être visualisée sans équation. Une particule extrêmement petite qui répond presque instantanément au gaz tend à suivre les lignes de courant. Si celles-ci contournent le bord du collecteur, la particule peut être déviée avec elles et ne jamais rencontrer la surface. Une particule plus grande ou plus dense conserve davantage sa vitesse initiale : lorsque le gaz tourne, elle « coupe » plus facilement la courbure des lignes de courant et peut impacter le plateau. Entre ces deux comportements existe une zone intermédiaire où quelques variations de taille, de densité ou de vitesse suffisent à modifier fortement la probabilité de capture. Cette sensibilité explique pourquoi la taille de la population recherchée est une grandeur scientifique centrale et pas seulement un paramètre à insérer dans un calcul.

Nous décrivons cette compétition par un nombre de Stokes adapté au régime considéré. Il compare grossièrement le temps de réponse de la particule au temps caractéristique de l'écoulement autour du collecteur. Lorsque ce rapport est très faible, la particule suit le gaz ; lorsqu'il devient plus élevé, son inertie prend de l'importance. Dans un régime raréfié, le temps de réponse n'est pas calculé avec la seule loi de Stokes continue : la transition vers un frottement de type Epstein ou vers une correction de glissement doit être examinée en fonction du nombre de Knudsen local. Nous n'utilisons donc pas un unique modèle de traînée sur toute la trajectoire sans vérifier son domaine de validité.

Cette physique a une conséquence directe sur le dessin du collecteur. L'aire projetée du plateau ne suffit pas : son emplacement par rapport à la peau du module, la présence d'un bord, la profondeur d'une cavité et l'angle d'incidence peuvent créer des régions où les particules sont préférentiellement déviées ou au contraire concentrées. Une recirculation locale peut également augmenter le temps de résidence du gaz sans améliorer la capture d'une particule très bien couplée. C'est la raison pour laquelle nous devons calculer une *aire efficace* qui dépend des conditions et des propriétés des particules, plutôt que d'assimiler toute la surface physique à une surface collectrice parfaite.

Le calcul suit alors une chaîne cohérente. Pour un état de vol donné, nous déterminons d'abord les propriétés atmosphériques et la vitesse du véhicule. Nous calculons ensuite l'écoulement autour de la géométrie représentative. Dans ce champ, des familles de particules de tailles et de densités différentes sont injectées avec des conditions initiales documentées. Leurs trajectoires sont intégrées jusqu'à ce qu'elles atteignent une surface, quittent le domaine ou deviennent numériquement indéterminées. Le rapport entre particules injectées et particules interceptées fournit une efficacité géométrique et aérodynamique locale. Répété sur plusieurs instants du vol, ce calcul construit la fonction de transfert de l'expérience.

La littérature sur la collecte in situ en fusée-sonde montre déjà que la géométrie et la cinématique du prélèvement sont indissociables de l'analyse finale [13, 14]. Notre objectif reprend cette exigence de traçabilité sans reproduire exactement une architecture antérieure : une particule observée au retour doit être replacée dans un cadre où l'on sait quelles classes de particules avaient une probabilité raisonnable d'atteindre la surface. C'est également ce qui rend une non-détection informative. Si le modèle prédit une forte efficacité pour une population donnée et que cette population n'est pas observée malgré un fond maîtrisé, la conclusion n'est pas la même que si le modèle montre qu'elle devait contourner le collecteur.

3.3.5 Une carte de capture plutôt qu'un rendement unique

Le rendement de collecte sera donc représenté comme une carte dépendant au minimum de l'altitude ou du temps, de la taille des particules, de leur densité et de la configuration aérodynamique. Lorsque l'orientation du véhicule intervient, elle sera intégrée de la même manière. Une telle carte permet de voir immédiatement où se situent les régions robustes, où le résultat dépend fortement d'une hypothèse et quelles mesures de vol réduisent réellement l'incertitude.

Cette représentation est plus utile qu'un pourcentage unique. Un « rendement de 50 % » ne dit rien si l'on ne sait pas pour quelle taille, quelle vitesse et quel régime il a été calculé. À l'inverse, une courbe montrant qu'une classe nanométrique est fortement déviée alors qu'une population plus grande est efficacement interceptée informe directement l'interprétation du prélèvement. Elle permet également de dimensionner les essais sur particules analogues et de choisir les cas les plus discriminants pour la simulation.

3.3.6 Performance intégrée

Une fois les trajectoires calculées, la performance peut être exprimée sous forme de cartes de probabilité d'impact plutôt que par un seul rendement global. Cette approche permet de répondre à plusieurs questions concrètes : quelle part du plateau est réellement alimentée ? quelles tailles de particules sont

préférentiellement capturées ? l'orientation du véhicule crée-t-elle des zones masquées ? les bords de la trappe ou du carter induisent-ils des recirculations susceptibles de contaminer ou au contraire de protéger certaines zones ?

Ces résultats ont une conséquence directe sur l'analyse post-vol. Une distribution non uniforme des dépôts n'est pas nécessairement un défaut. Si elle est prédite par l'écoulement et retrouvée sur les supports, elle constitue au contraire une information supplémentaire sur la capture. La cartographie des impacts devra donc conserver la position des particules sur le plateau et ne pas réduire l'échantillon à un simple comptage total.

Les incertitudes resteront importantes. La concentration atmosphérique des MSP varie fortement avec la saison, l'altitude, la latitude et les processus microphysiques. Les propriétés exactes des particules sont elles aussi dispersées. Plutôt que d'annoncer un nombre unique de particules attendues, le modèle final produira une plage ou une distribution probabiliste. Une estimation sur plusieurs ordres de grandeur est moins spectaculaire qu'une valeur précise, mais elle est scientifiquement plus honnête et beaucoup plus utile pour dimensionner l'analyse.

Performance à communiquer

Aucune valeur unique de rendement ou de nombre collecté ne sera présentée comme garantie avant que le modèle de trajectoire, la fenêtre de vol et les propriétés réelles des supports aient été réconciliés. Les résultats seront donnés sous forme de plages, avec les hypothèses dominantes et une séparation entre interception, rétention et identification.

3.3.7 Objectif quantitatif de prélèvement

Le dimensionnement scientifique part des analyses post-vol, puis remonte vers le besoin de collecte. La planification actuelle vise environ **200 particules exploitables** pour permettre une combinaison de comptage, microscopie, analyses élémentaires et contrôles de contamination. En tenant compte d'une fraction d'échantillons inutilisables, ambigus ou perdus lors de la préparation, le seuil de planification est fixé à **400 particules collectées**, avec une zone de confort de **600 à 750**. Ce sont des objectifs de conception, pas une promesse de rendement.

Le tableau 3.3 montre l'ordre de grandeur des besoins analytiques. Plusieurs techniques pourront être appliquées successivement au même objet ; les valeurs servent donc à vérifier que le prélèvement possède une marge suffisante plutôt qu'à imposer une partition rigide.

Table 3.3 – Ordres de grandeur utilisés pour planifier l'exploitation de l'échantillon.

Analyse	Besoin indicatif	Information recherchée
Cartographie et trajectoires d'impact	~ 50	Répartition des dépôts et géométrie des pistes
Microscopie optique	~ 50	Tri initial, dimensions, morphologie générale
MEB/SEM	~ 30	Morphologie fine et texture de surface
EDS/EDX	~ 20	Composition élémentaire locale
Raman / FTIR	~ 20	Phases et liaisons chimiques lorsque le signal le permet
Analyse isotopique	~ 10, conditionnelle	Indice d'origine lorsque la masse et la préparation sont compatibles
Contrôle de contamination	~ 20	Comparaison avec témoins et blancs

Le modèle de flux sera ensuite utilisé pour déterminer la probabilité d'atteindre ce seuil. Les sorties seront exprimées sous forme de plages et de sensibilités aux paramètres dominants : concentration, taille, vitesse, orientation et efficacité de capture. Une estimation historique fondée sur une exposition courte à l'apogée ne constitue donc plus la performance de référence ; la configuration actuelle utilise l'intégration entre les deux passages à 60 km.

3.3.8 Aérogel, supports analytiques et géométrie disponible

Le support de collecte doit arrêter ou retenir les particules tout en conservant des informations exploitables. L'aérogel de silice constitue la référence principale en raison de sa faible densité et de son expérience d'utilisation pour la capture de poussières [16, 17]. Des supports minces de type grille TEM complètent cette approche en offrant une surface transférable directement vers certaines techniques de microscopie. La configuration étudiée comprend des grilles de nickel à maillage hexagonal de l'ordre de 100 mesh, avec des ouvertures proches de 250 µm et des barres de l'ordre de 30 µm.

La géométrie de vol doit converger avec la CAO. Un premier cahier d'essais matériaux utilisait jusqu'à 40 mm d'épaisseur d'aérogel afin d'explorer la tenue et la pénétration. La CAO mécanique actuelle réserve environ 5 mm de hauteur dans la cassette de vol, sur une surface de l'ordre de $1,68 \times 10^4 \text{ mm}^2$. Ces deux valeurs décrivent deux étapes différentes du développement : 40 mm est une enveloppe de coupon d'étude, tandis que la hauteur de la cassette constitue la contrainte d'intégration actuelle. L'épaisseur de vol sera figée après les essais de pénétration et la consolidation du volume mécanique.

Cette clarification est essentielle pour le dimensionnement : le matériau doit être caractérisé sur une épaisseur représentative de la cassette réellement embarquée. Les formulations dopées au graphène ou à Fe_3O_4 restent des variantes de laboratoire ; la référence de vol demeure un aérogel de silice dont le fond chimique peut être mesuré et comparé aux témoins.

La voie envisagée est une synthèse sol-gel de silice suivie d'un séchage permettant de conserver la structure poreuse. Avant intégration, chaque lot devra être associé à une fiche de fabrication : précurseurs, ratios, conditions de vieillissement, méthode de séchage, dimensions obtenues et éventuels défauts visibles. Cette traçabilité est indispensable pour comparer deux essais d'impact ou interpréter une différence de comportement entre plusieurs zones du plateau.

La densité apparente sera déterminée à partir de la masse et du volume, complétée si possible par une mesure de porosité ou une caractérisation structurale adaptée. La résistance à la compression et la tenue à la manipulation seront mesurées sur des éprouvettes représentatives. La campagne de préparation se concentre sur **les propriétés qui entrent directement dans le calcul d'impact et dans le risque de fragmentation pendant le vol**, sans chercher à couvrir l'ensemble de la science des aérogels.

Des formulations fonctionnalisées, par exemple avec des additifs magnétiques ou carbonés, peuvent être intéressantes pour améliorer la rétention ou faciliter certaines analyses. Elles ne seront toutefois pas considérées comme référence tant que leur propre signature chimique et leur influence sur l'analyse ne sont pas maîtrisées. Ajouter une fonction au matériau n'a de sens que si l'on gagne plus d'information qu'on n'en perd en augmentant le fond analytique.

La caractérisation des matériaux sera organisée autour de lots plutôt que d'échantillons isolés. Pour chaque formulation d'aérogel, plusieurs pièces seront produites dans des conditions aussi identiques que possible. La dispersion de densité et de dimensions donnera une mesure de la reproductibilité du procédé. Une formulation dont les performances moyennes sont bonnes mais dont la variabilité est très grande sera moins intéressante pour le vol qu'une formulation légèrement moins performante mais robuste et prévisible.

Les essais mécaniques seront adaptés à la fragilité du matériau. Une mesure de compression permettra d'estimer l'ordre de grandeur de la résistance et d'alimenter le modèle de pénétration, mais elle sera complétée par des observations après vibration et manipulation. Un aérogel peut résister à une compression uniforme tout en s'écaillant au niveau de son logement sous vibration. La géométrie de maintien sera donc testée avec le matériau réel et non uniquement avec une masse factice.

La compatibilité analytique sera évaluée avant de figer la formulation. Un spectre EDS ou Raman du support vierge servira de référence. Les éléments provenant des précurseurs, des additifs ou du procédé de fabrication seront répertoriés. Cette base permettra de choisir les régions spectrales et les éléments réellement discriminants après le vol. Elle sera aussi utile pour identifier un changement du support après vieillissement ou exposition thermique.

Les grilles et autres supports minces suivront une démarche similaire. Le choix du nickel, par exemple, offre une bonne tenue et une compatibilité avec certaines préparations de microscopie, mais le nickel devient alors un élément du fond instrumental. Une particule riche en Ni située sur une grille de Ni devra donc être interprétée avec plus de prudence qu'une même signature observée sur une autre zone. Cette interaction entre matériau et analyse justifie la présence de supports complémentaires.

Le maintien des substrats dans le plateau sera conçu pour éviter les contraintes localisées. Les aérogels ne doivent pas être serrés comme une pièce métallique ; ils doivent être retenus sans être écrasés, tout en ne pouvant pas se libérer sous vibration. Les jeux devront prendre en compte la dilatation des matériaux et les tolérances de fabrication. Un insert ou une géométrie d'encadrement peut être préférable à une fixation directe.

Après chaque essai environnemental, le support sera observé selon le même protocole : photographie globale, inspection des bords, masse lorsque la sensibilité est suffisante et observation de particules éventuellement libérées. Cette répétition permettra de distinguer une dégradation progressive d'un défaut ponctuel et d'établir une limite claire d'acceptation avant intégration du matériel de vol.

3.3.9 Caractérisation et validation des supports

La fabrication d'un aérogel ne se termine pas lorsque le monolithe est démoulé. Deux pièces obtenues avec une même recette peuvent présenter des différences de retrait, de densité, de fissuration ou de contamination. Or ces différences modifient à la fois la capacité de freinage et le fond analytique. Chaque lot destiné aux essais ou

au vol doit donc être accompagné d'un ensemble minimal de mesures permettant de savoir ce qui a réellement été fabriqué.

La première grandeur est la densité apparente, obtenue à partir de la masse et du volume avec une incertitude compatible avec la fragilité du matériau. Elle donne une indication globale de la quantité de solide rencontrée par une particule et peut être comparée aux valeurs utilisées dans le modèle de pénétration. Le retrait linéaire et la géométrie finale sont mesurés en parallèle : un aérogel dont la densité est correcte mais dont la contraction empêche l'intégration dans le plateau n'est pas un lot utilisable. La présence de fissures, de gradients visibles ou de défauts de surface est documentée par photographie avant tout essai.

La porosité et la structure du réseau de silice influencent le freinage, mais aussi l'extraction et l'observation d'une piste. Selon les moyens disponibles, leur caractérisation peut combiner mesures de densité, microscopie, adsorption ou autres méthodes adaptées. Nous ne chercherons pas à multiplier les techniques pour elles-mêmes : la question est de mesurer les propriétés qui font varier un résultat du modèle ou une étape d'analyse. Si deux lots donnent des comportements d'impact différents, il faut disposer de suffisamment d'informations pour comprendre si cette différence provient de la densité, de la structure, de la résistance mécanique ou d'un autre paramètre.

La tenue mécanique est également évaluée avant le vol. Le monolithe doit survivre à la manipulation, au montage, aux vibrations et aux accélérations sans se pulvériser dans le compartiment. Une résistance élevée n'est cependant pas un objectif absolu : densifier excessivement le matériau peut augmenter la perturbation subie par la particule à l'impact. Nous cherchons donc un domaine de propriétés dans lequel la pièce reste manipulable et compatible avec le vol tout en conservant l'intérêt d'un freinage progressif. Les essais de compression ou de flexion sont interprétés dans ce cadre, avec une attention particulière à la dispersion entre éprouvettes.

3.3.10 Le fond chimique fait partie des propriétés du matériau

Pour une expérience d'analyse de traces, la pureté ne peut pas être réduite à une mention de fiche fournisseur. Le réseau de silice, les solvants, les agents de surface, les outils de fabrication et le conditionnement peuvent tous introduire des espèces susceptibles d'apparaître plus tard au MEB-EDS, en Raman ou en FTIR. Une partie de la caractérisation consiste donc à analyser un aérogel vierge selon une chaîne aussi proche que possible de celle utilisée après le vol. Le but est de construire une bibliothèque du fond avant de chercher à identifier des particules exogènes.

Cette étape est particulièrement importante si des formulations fonctionnalisées sont étudiées. L'ajout de particules magnétiques, de carbone ou d'autres additifs peut améliorer une propriété de capture mais créer simultanément une signature chimique qui masque le signal recherché. Une formulation modifiée ne sera donc retenue que si son avantage est démontré par rapport à une référence en silice et si son fond reste compatible avec les analyses prévues. L'innovation matériau est utile uniquement lorsqu'elle améliore le résultat scientifique global.

La reproductibilité sera testée sur plusieurs lots. Un seul monolithe réussi ne suffit pas pour figer une recette de vol : il faut montrer que les paramètres critiques restent dans une plage acceptable lorsque la fabrication est répétée. Cette exigence permet aussi de réserver des échantillons témoins issus du même lot que les pièces de vol. Après la mission, comparer un support exposé à un support vierge provenant de la même fabrication réduit le risque d'attribuer à l'atmosphère une hétérogénéité propre au matériau.

3.3.11 Relier essais d'impact et modèle de pénétration

Les modèles publiés de pénétration dans l'aérogel montrent que la morphologie d'une piste dépend fortement de la taille, de la densité et de la vitesse de l'impacteur ainsi que des propriétés de l'aérogel [21]. Ils fournissent un cadre utile, mais les particules et les vitesses étudiées dans ces travaux ne recouvrent pas nécessairement toute la population visée ici. Nous utilisons donc le modèle pour identifier les tendances et choisir des essais, pas pour déclarer par avance une profondeur d'arrêt exacte.

Les essais sur analogues auront deux objectifs. Le premier est mécanique : vérifier qu'une famille de particules est effectivement retenue dans l'épaisseur disponible sans traversée ou fragmentation systématique. Le second est analytique : vérifier que la piste et le résidu peuvent être retrouvés, localisés puis étudiés avec les instruments prévus. Une bonne performance de capture qui rend l'objet impossible à extraire ou à identifier ne constitue pas une bonne performance scientifique.

Le résultat de ces essais sera réinjecté dans le dimensionnement. Si les pistes sont trop courtes pour être repérées, trop longues pour l'épaisseur disponible ou trop altérées pour l'analyse, nous pourrions ajuster la densité, l'épaisseur, la géométrie du logement ou la répartition entre substrats. Le plateau et le matériau évoluent donc ensemble ; l'un ne sera pas figé indépendamment de l'autre.

L'aérogel n'est pas nécessairement le meilleur support pour toutes les tailles ni pour toutes les techniques d'analyse. Le plateau peut donc associer une zone de capture volumique à des supports minces destinés à recevoir directement des particules. Des grilles compatibles avec la microscopie électronique permettent, dans certains cas, de réduire

les manipulations après le vol et d'observer rapidement un dépôt. Une grille métallique à faible fond analytique peut ainsi compléter l'aérogel plutôt que le remplacer.

Cette complémentarité doit rester simple. Multiplier les matériaux sans hypothèse scientifique claire compliquerait le nettoyage, la modélisation et l'analyse. La configuration de référence sera donc limitée à quelques types de surfaces dont la fonction est distincte : une zone destinée à la rétention progressive, une zone favorisant l'observation directe et au moins un témoin qui subit les mêmes manipulations sans être exposé à la fenêtre scientifique.

La position de chaque support sur le plateau sera conservée dans le référentiel de la CAO. Cette cartographie permettra de comparer les dépôts aux trajectoires calculées. Si une zone proche du bord est prédite comme moins alimentée par l'écoulement, elle ne devra pas être interprétée de la même façon qu'une zone située au maximum de probabilité d'impact.

Une première estimation de la profondeur d'arrêt peut être obtenue par des modèles simplifiés de pénétration dans l'aérogel. Les travaux récents sur les pistes de particules dans la silice montrent que la distance de pénétration dépend de la taille, de la densité et de la vitesse de la particule ainsi que des propriétés mécaniques du matériau [21]. De tels modèles sont utiles pour identifier les tendances et éviter une géométrie manifestement inadéquate.

Ils ne doivent cependant pas être utilisés pour affirmer qu'une particule donnée « s'arrêtera dans la première couche » tant que les propriétés réelles de l'aérogel et la vitesse d'impact n'ont pas été mesurées ou bornées de façon crédible. Le calcul sera donc recalibré après fabrication des premiers échantillons. Des essais d'impact avec particules analogues permettront ensuite de comparer profondeur de piste, fragmentation et signature analytique.

Critère d'une capture exploitable

Le support doit conserver une information exploitable. Une particule intégralement retenue mais indistinguable du fond de silice, ou une particule dont l'impact détruit toute signature utile, ne répond pas au même objectif qu'un résidu localisable et analysable.

3.3.12 Maîtrise de la contamination

La contamination est l'un des risques scientifiques majeurs de COSMIC. Les particules recherchées contiennent des éléments courants dans l'environnement terrestre et dans les matériaux techniques. Une poussière métallique issue d'un usinage, un fragment de joint ou une particule déposée lors d'une manipulation peut donc produire un signal trompeur. La propreté doit être pensée dès la fabrication, et non ajoutée après coup au protocole de laboratoire.

Avant le vol, les supports seront fabriqués, nettoyés ou conditionnés selon une procédure documentée, puis manipulés avec des outils dédiés. Les contenants et les zones de stockage seront identifiés. Des témoins suivront la même chaîne de manipulation que les supports de vol. Pendant le vol, le carter fermé constitue la première barrière. Après la récupération, l'ouverture scientifique sera reportée jusqu'à un environnement contrôlé lorsque cela est possible.

Les pratiques de missions de retour d'échantillons montrent l'importance de la documentation du fond organique et inorganique ainsi que de la chaîne de manipulation [26, 27]. COSMIC adopte la même logique à son échelle : photographier, identifier les outils, limiter les ouvertures, conserver des témoins et documenter chaque transfert. L'échelle de propreté recherchée doit rendre **les contaminants détectables, traçables et discutables** au regard du signal scientifique attendu.

Le contrôle de contamination sera matérialisé par une séquence de référence répétable. Après fabrication, chaque support recevra un identifiant permanent ou un emballage portant cet identifiant. Une photographie de référence sera prise avant intégration. Les pinces, boîtes, gants et surfaces de travail utilisés pour les échantillons seront séparés autant que possible des outils employés sur le mécanisme. Les opérations génératrices de particules – perçage, ponçage, reprise de filetage, lubrification – seront terminées avant l'installation des supports scientifiques.

Lors de l'intégration, le temps d'exposition à l'air ambiant sera réduit et documenté. Cette information permettra d'expliquer une éventuelle différence entre un témoin intégré très tôt et un support placé plus tard. Un témoin « de manipulation » pourra rester fermé tout en suivant les mêmes transferts ; un témoin « de matériau » restera au laboratoire afin de caractériser le fond propre au lot d'aérogel ou de grille. Cette distinction évite d'attribuer au vol un contaminant déjà présent dans le matériau.

La récupération constitue une phase particulièrement critique parce que le module peut atterrir dans la neige, sur un sol minéral ou dans un environnement chargé en particules. La paroi externe peut alors être fortement contaminée alors que le volume interne reste propre. Le protocole prévoit donc de considérer l'extérieur du module comme une zone sale jusqu'à preuve du contraire. Les outils utilisés pour ouvrir l'enveloppe externe ne seront pas réutilisés directement sur les supports scientifiques sans nettoyage ou changement.

Enfin, la contamination sera traitée quantitativement lorsque cela est possible. Un fond élémentaire mesuré sur plusieurs témoins pourra être comparé au signal des surfaces exposées. Une particule composée d'un alliage identique à une pièce proche du mécanisme sera classée avec prudence même si elle n'apparaît pas sur tous les témoins. À l'inverse, une signature absente des matériaux du module et associée à une morphologie d'impact cohérente constituera un candidat plus intéressant. Le protocole d'interprétation est donc conçu avant le vol pour éviter que le critère de sélection ne soit ajusté après avoir vu les résultats.

Référence de collecte

La configuration de vol conservera une référence de silice non dopée et un témoin protégé. Toute formulation supplémentaire devra démontrer au sol qu'elle améliore la capture ou l'analyse sans introduire une ambiguïté chimique supérieure au bénéfice attendu.

3.4 Système embarqué et reconstruction du vol

3.4.1 Architecture de commande et instrumentation

Le système embarqué remplit deux fonctions indissociables : exécuter la séquence mécanique et enregistrer les informations nécessaires à son interprétation. Le calculateur actuellement retenu pour le prototypage est basé sur une STM32 Nucleo. La mesure associe un capteur de pression absolue Honeywell ABP, un capteur de température TMP117 et une IMU ISM330DHCX [34, 35, 36, 37]. **La position du tiroir doit être mesurée, et pas déduite de la seule commande moteur.** Elle est suivie par des informations diversifiées - fin de course, capteurs à effet Hall et encodeur - afin de distinguer une commande d'un déplacement réellement accompli.

Le tableau 3.4 résume le rôle de chaque mesure. Les références finales pourront évoluer après essais à basse pression et en température ; le besoin fonctionnel restera inchangé.

Table 3.4 – Fonctions principales de l'instrumentation embarquée.

Fonction	Solution actuelle	Information exploitée
Calcul et logique	STM32 Nucleo	Machine d'états, horodatage, commande, journal d'événements
Pression	Honeywell ABP	Contexte atmosphérique et cohérence de la phase de vol
Température	TMP117	Historique thermique du module et des phases critiques
Dynamique	ISM330DHCX	Accélérations, vitesses angulaires, chocs et phases dynamiques
Position	Fin de course + Hall + encodeur	Début/fin de mouvement, position ouverte/fermée, incohérences
Stockage	Mémoire non volatile / SD	Conservation autonome du journal et des données brutes

Commander le moteur pendant un temps donné ne suffit pas à prouver que le plateau a bougé. La position est donc observée par plusieurs informations complémentaires. Un capteur de fin de course fournit une indication physique de l'arrivée en butée ; des capteurs à effet Hall peuvent confirmer le passage dans certaines zones ; un encodeur lié à la transmission permet de suivre le déplacement attendu. Ces informations ne sont pas identiques, ce qui est précisément leur intérêt : un moteur qui tourne sans entraîner le tiroir peut être détecté par l'incohérence entre l'encodeur, le temps et les capteurs de position.

La logique de contrôle ne doit toutefois pas créer une fausse redondance. Deux capteurs alimentés par la même chaîne et lus par le même microcontrôleur ne constituent pas deux systèmes indépendants. La stratégie retenue vise d'abord la diversité des observables et une fermeture sûre en cas d'incohérence. La qualification déterminera ensuite quelles fonctions doivent être réellement redondées au niveau matériel.

3.4.2 Déclenchement et machine d'états

Le seuil scientifique est exprimé en altitude, mais le déclenchement embarqué doit utiliser une information réellement disponible et suffisamment fiable. Un capteur de pression miniature est très utile pour caractériser l'environnement. Sa mesure ne sera toutefois pas utilisée seule pour déterminer précisément

l'altitude dans toute la mésosphère, car la pression dépend de l'atmosphère réelle et de la plage utile du capteur. La plage de mesure retenue devra notamment rester compatible avec le domaine du pascal.

La référence de commande sera donc construite à partir des événements de mission disponibles, d'un temps de vol calculé à partir du profil final et, si l'interface REXUS le permet, d'une information fournie par le système de service. La pression mesurée et l'IMU apporteront une validation a posteriori du contexte. Cette distinction est importante : un capteur peut être très utile scientifiquement sans devenir l'unique déclencheur d'une fonction critique.

Le scénario nominal comporte un délai maximal pour chaque mouvement. Si la position ouverte n'est pas atteinte avant la fin de ce délai, le moteur est arrêté afin d'éviter un effort prolongé. Au moment de la fermeture, la logique devient plus conservatrice : l'objectif est de ramener le plateau vers l'état fermé et de confirmer cet état par plusieurs indices cohérents. Une anomalie doit produire un état identifiable dans les données, pas être masquée par une succession de tentatives non tracées.

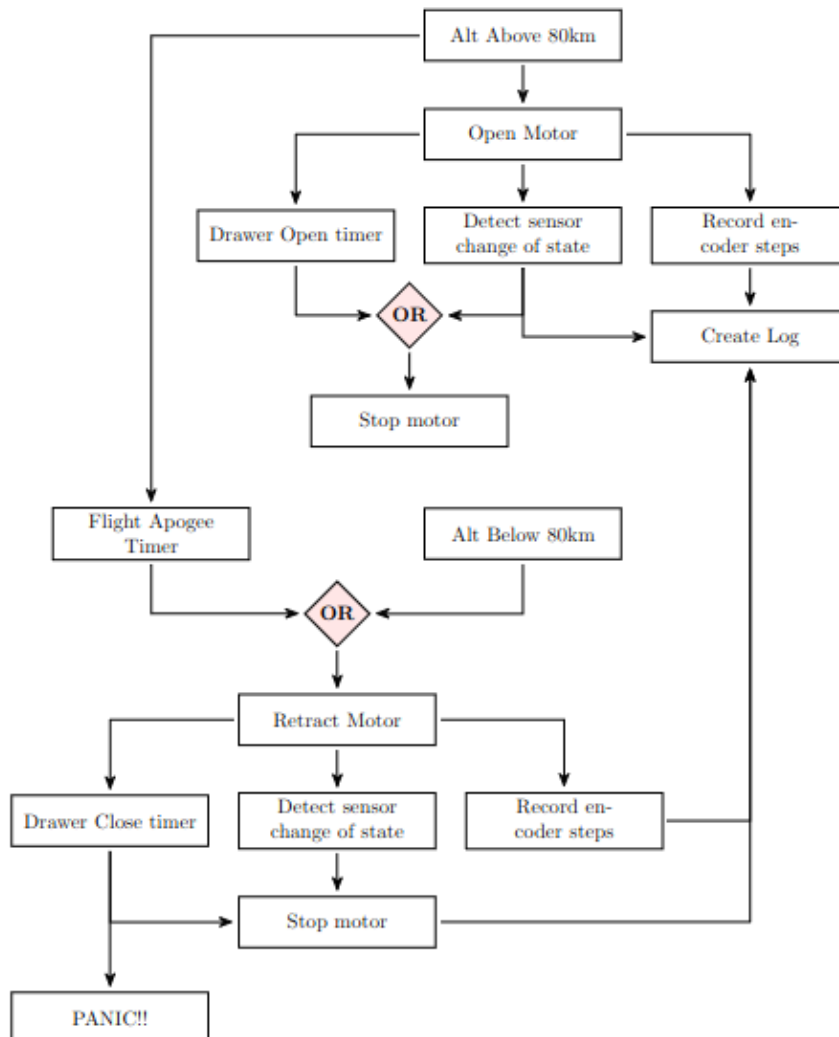


Figure 3.7 – Logique générale de commande. La version de vol sera exprimée comme une machine d'états avec transitions, temporisations et conditions d'abandon explicitement testables.

La figure 3.7 doit être lue comme la chronologie logique d'un mouvement : chaque flèche correspond à une condition mesurable et chaque état impose une action autorisée. Le passage vers l'ouverture exige des conditions de mission cohérentes ; le retour vers la fermeture devient prioritaire à la fin de la fenêtre ou en présence d'un défaut. **Cette représentation permet de transformer une séquence logicielle en cas d'essais reproductibles : chaque transition doit pouvoir être déclenchée, observée et retrouvée dans le journal du Flight Simulation Test.**

3.4.3 Acquisition et conservation des données

Trois familles de mesures sont prioritaires. La pression donne un contexte sur le niveau atmosphérique et permet de vérifier la cohérence du profil. La température suit l'environnement interne et aide à interpréter les

variations des composants ou des matériaux. L'IMU enregistre accélérations et vitesses angulaires, ce qui permet d'identifier la propulsion, les phases de faible accélération, les chocs et les mouvements du véhicule.

Les fréquences d'échantillonnage ne seront pas identiques pour toutes les grandeurs. Une température interne varie lentement et ne nécessite pas le même débit qu'un événement mécanique de quelques secondes. La stratégie de données distingue donc un journal événementiel asynchrone, un échantillonnage rapide pendant l'ouverture et la fermeture, un échantillonnage intermédiaire de l'IMU pendant les phases dynamiques et un rythme plus lent pour les grandeurs quasi stationnaires. Cette hiérarchie limite le volume mémoire tout en conservant l'information utile.

Les données sont enregistrées localement sur une mémoire non volatile. Un horodatage cohérent relie les commandes, les états de capteurs et les mesures physiques. Après le vol, une copie bit-à-bit du fichier brut sera conservée avant toute conversion. Le traitement produira ensuite une chronologie lisible : altitude estimée, états du mécanisme, accélérations, température, pression et éventuelles anomalies.

Le logiciel sera développé comme une machine d'états explicite plutôt qu'une succession de conditions dispersées. Chaque état correspond à une situation physique du système : SAFE/fermé, armé, ouverture en cours, ouvert, fermeture en cours, fermé confirmé et anomalie. Les transitions sont déclenchées par des événements identifiables. Cette structure rend le code plus facile à tester et surtout plus facile à relire après le vol : un changement d'état possède une cause et un horodatage.

Les temporisations seront traitées comme des barrières de sécurité. Si un mouvement dépasse sa durée maximale, le logiciel ne continuera pas à alimenter le moteur indéfiniment. Le dépassement sera enregistré et la stratégie de repli appliquée. De même, une incohérence entre un capteur de fin de course et l'encodeur ne sera pas automatiquement « corrigée » en choisissant l'un des deux sans trace ; elle produira un drapeau d'anomalie conservé dans les données.

Le démarrage du calculateur après une coupure fera l'objet d'un scénario spécifique. Le logiciel doit être capable de déterminer s'il est avant le vol, en phase de mission ou après un redémarrage inattendu. Lorsque l'état physique ne peut pas être établi avec confiance, le comportement le plus conservateur sera privilégié. Un *watchdog* matériel ou logiciel limitera les blocages silencieux.

La structure des fichiers sera documentée avant le vol et accompagnée d'un outil de décodage simple. Les conversions d'unités, étalonnages et corrections seront appliqués lors du traitement, mais les valeurs brutes seront conservées. Cette distinction est indispensable pour permettre une réanalyse ultérieure si un étalonnage est amélioré ou si une erreur de traitement est découverte.

L'horloge n'a pas besoin d'être une référence absolue à la microseconde pour être utile ; elle doit en revanche être stable et alignable avec la chronologie REXUS. Un événement commun ou une séquence de synchronisation permettra de relier le temps local au temps de mission. Les incertitudes d'horodatage seront ensuite propagées dans la détermination de la fenêtre d'exposition.

Le traitement post-vol produira trois niveaux de données : fichier brut immuable, données étalonnées et produits scientifiques. Ces derniers comprendront la chronologie d'état, les courbes de pression et température, la dynamique IMU et les périodes d'exposition. Cette organisation permet de conserver l'origine de chaque valeur utilisée dans l'analyse sans surcharger le SED de détails logiciels.

Pendant la mission, l'électronique commande le mécanisme ; après la mission, elle devient la mémoire de l'expérience. Cette seconde fonction impose une architecture de données pensée dès la conception. Un journal utile enregistre davantage que l'envoi d'une commande « ouvrir » : il permet de savoir quand le mouvement a commencé, comment la position a évolué, quand l'état ouvert a été confirmé, quelles conditions régnaient pendant l'exposition et dans quel état le collecteur s'est refermé.

Nous utilisons pour cela deux types d'informations complémentaires. Les événements discrets décrivent les changements d'état : armement, autorisation d'ouverture, début et fin de mouvement, confirmation ouverte, début de fermeture, confirmation fermée, défaut ou bascule vers un mode sûr. Les grandeurs continues décrivent le contexte : pression, température, accélérations, vitesses angulaires, position estimée et grandeurs électriques utiles. Cette séparation évite de chercher un événement rapide dans un signal enregistré trop lentement et, à l'inverse, de surcharger la mémoire avec une fréquence élevée lorsque la grandeur varie peu.

L'horodatage constitue le lien entre ces deux familles. Toutes les données doivent être référencées à une même base de temps ou pouvoir être resynchronisées sans ambiguïté. Une dérive d'horloge faible sur quelques minutes peut sembler négligeable, mais elle devient problématique si l'on veut comparer l'instant d'ouverture avec un événement de trajectoire ou une variation rapide d'accélération. La procédure de préparation inclura donc la vérification de l'horloge, la définition d'un instant de référence et la conservation des informations nécessaires au recalage avec les données fournies par REXUS.

La calibration des capteurs est traitée de la même manière. **L'objectif est de connaître la relation entre la valeur enregistrée et la grandeur physique dans notre chaîne complète**, au-delà de la seule précision annoncée dans la fiche technique. Pour la température, cela implique notamment le montage, l'inertie thermique et l'emplacement. Pour la pression, la plage utile et la réponse à basse pression sont déterminantes. Pour l'IMU, les

offsets, la saturation et l'orientation dans le repère du module doivent être documentés. Les capteurs sélectionnés fournissent une base adaptée, mais leurs performances seront caractérisées sur le système intégré plutôt que simplement recopiées depuis les documentations constructeur [35, 36, 37].

3.4.4 Des données brutes aux données interprétées

Les fichiers de vol conserveront autant que possible les valeurs brutes ou faiblement traitées, accompagnées de la configuration logicielle et des coefficients de calibration. Les grandeurs dérivées — altitude estimée, vitesse, phase de vol, angle ou état fusionné — seront recalculées au sol avec une méthode versionnée. Cette organisation permet de corriger une erreur d'algorithme sans perdre la mesure originale et de comparer plusieurs méthodes de reconstruction.

Au retour, la première étape sera de produire une chronologie unique de la mission. Elle superposera les états mécaniques, les données environnementales et les événements de trajectoire. Cette chronologie deviendra ensuite l'entrée des modèles de capture : au lieu de calculer avec une durée et une vitesse moyennes, nous pourrions intégrer la performance sur des conditions qui ont réellement évolué pendant le vol. Le même fichier servira enfin à documenter l'histoire de l'échantillon : durée d'ouverture, anomalies éventuelles, température maximale observée après fermeture et événements mécaniques susceptibles d'avoir affecté le support.

Une donnée manquante n'est pas équivalente à une mauvaise donnée. Si un capteur sature ou devient incohérent, le journal doit conserver cet état plutôt que substituer silencieusement une valeur plausible. L'analyse pourra alors décider si une autre grandeur fournit une redondance suffisante ou si l'incertitude doit être élargie. Cette transparence est essentielle : la valeur scientifique d'un prélèvement dépend autant de la connaissance de ses limites que de la quantité d'informations acquises.

3.4.5 Puissance et robustesse électrique

L'actionneur constitue une charge impulsionnelle différente de l'électronique de mesure. Pour éviter qu'un appel de courant du moteur ne provoque une chute de tension sur le calculateur, les fonctions sont séparées électriquement autant que possible. Une alimentation régulée est dédiée à la logique et aux capteurs ; la motorisation utilise une chaîne adaptée à son courant et à sa tension. Les masses, protections et interfaces seront néanmoins conçues dans le respect du concept de mise à la masse REXUS et des exigences de compatibilité électromagnétique.

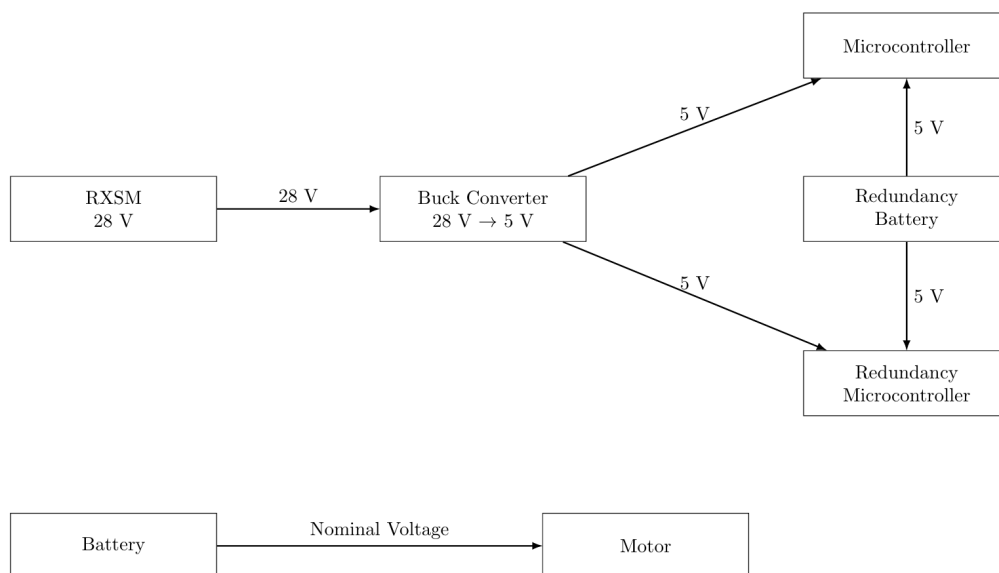


Figure 3.8 — Architecture de puissance étudiée pour séparer les besoins de la logique, de l'instrumentation et de l'actionnement. Les valeurs finales seront issues de mesures sur prototype.

Le schéma de la figure 3.8 matérialise la séparation entre logique et actionnement. La branche de commande alimente le calculateur et les capteurs, tandis que la branche de puissance fournit l'énergie nécessaire au moteur ; les deux se rejoignent uniquement aux interfaces explicitement prévues. **L'enjeu de cette architecture est d'éviter qu'un appel de courant ou un parasite généré par le moteur ne réinitialise le calculateur ou ne corrompe les mesures.** L'essai électrique vérifiera cette séparation pendant les transitoires moteur.

Le bilan de puissance final sera établi à partir de mesures, pas seulement des fiches techniques. Il comportera le courant moyen de l'électronique, le courant de pointe du moteur, la durée des mouvements, les marges de conversion

et l'énergie nécessaire aux phases où le système doit rester autonome. Les éventuelles batteries supplémentaires devront respecter les règles REXUS applicables à leur technologie et à leur intégration [1].

Principe de conception

La meilleure donnée n'est pas celle qui décrit tout le vol avec le débit maximal. C'est celle qui permet de reconstruire sans ambiguïté l'état scientifique du système au moment où les surfaces ont été exposées.

La chaîne d'alimentation sépare la logique de mesure de la motorisation afin qu'un appel de courant pendant un mouvement ne provoque pas la perte du calculateur. La logique fonctionne autour d'un rail régulé de 5 V ; l'actionneur utilise une alimentation adaptée à son domaine 24–48 V. La compatibilité avec l'interface RXSM, les protections et l'état électrique imposé pendant la radio-silence seront vérifiés sur le système assemblé. Toute source autonome éventuelle disposera d'un moyen de coupure garantissant un état réellement inerte lorsque REXUS l'exige [1].

Le rythme d'acquisition est volontairement multirate. Un mouvement de l'ordre de 4 s demande un enregistrement rapide des états et de l'IMU, tandis que pression et température peuvent être suivies plus lentement hors phase critique. Le journal événementiel reste asynchrone : chaque transition importante est enregistrée au moment où elle se produit. Cette organisation remplace l'ancienne idée d'un paquet uniforme toutes les vingt secondes, trop lent pour reconstruire correctement l'ouverture et la fermeture.

3.5 Validation du système intégré

La validation suit une progression du composant vers l'expérience complète. Chaque essai répond à une question précise : le tiroir parcourt-il sa course sous les conditions défavorables ? la structure conserve-t-elle ses marges après vibration ? les joints maintiennent-ils la protection particulière en basse pression et après cycles thermiques ? les supports conservent-ils leur intégrité ? le logiciel reconstruit-il correctement la chronologie ? Cette logique permet de relier chaque résultat d'essai à un critère de réussite du tableau 1.1.

La qualification ne sera pas un essai unique effectué à la fin du projet. Chaque fonction est d'abord vérifiée séparément, puis dans des assemblages de plus en plus représentatifs. Cette progression évite de découvrir lors d'un essai intégré qu'une panne simple aurait pu être détectée plus tôt. Elle permet aussi de rattacher chaque essai à une question claire : le matériau résiste-t-il à la manipulation ? le mécanisme conserve-t-il ses jeux à froid ? le moteur fournit-il le couple nécessaire ? la fermeture reste-t-elle détectable après vibration ? les données permettent-elles de reconstruire l'événement ?

Les modèles analytiques et numériques sont utilisés en amont pour définir les cas sévères. Ils ne remplacent pas l'essai. Une simulation mécanique peut montrer qu'une contrainte est inférieure à la limite élastique ; seule une configuration représentative permet de vérifier que les jeux, les assemblages, les vis, les câbles et les capteurs se comportent comme prévu. De la même façon, une CFD peut prédire une zone de capture favorable ; un essai avec particules analogues reste nécessaire pour vérifier la rétention et l'analyse.

Chaque essai produira un compte de résultat intégré à la configuration du système, mais le SED n'en présentera pas la provenance comme une juxtaposition de travaux. Ce qui importe pour la revue est la continuité de la preuve : l'exigence, la configuration testée, la procédure, le résultat, l'écart éventuel et la décision qui en découle. Cette structure permet de lire l'expérience comme un objet unique même lorsque les mesures sont acquises à des dates différentes.

Les critères d'acceptation seront fixés avant l'essai. Pour un cycle d'ouverture, par exemple, le critère peut porter sur l'atteinte de la position, le temps maximal, le courant moteur et l'absence de dommage. Pour un essai de vibration, il peut inclure l'absence de pièce desserrée, le maintien de la géométrie et un cycle complet immédiatement après l'excitation. Définir le critère avant de voir le résultat limite le risque de considérer a posteriori comme « acceptable » une performance simplement parce que le prototype a survécu.

Lorsqu'un essai échoue, la correction sera traitée comme une évolution de conception et non comme une note isolée. La version modifiée devra être identifiée, puis la partie pertinente de la vérification répétée. Ce fonctionnement est particulièrement important pour un mécanisme où une petite modification de jeu, de joint ou de motorisation peut avoir des conséquences sur la mécanique, la puissance, la contamination et le temps de mouvement.

3.5.1 Mécanisme et structure

Le mécanisme sera d'abord cyclé à température ambiante afin de mesurer le temps d'ouverture, le temps de fermeture, le courant moteur, la répétabilité de position et l'évolution du jeu. Les cycles seront répétés jusqu'à dépasser largement le nombre de mouvements prévu pendant la campagne, de manière à

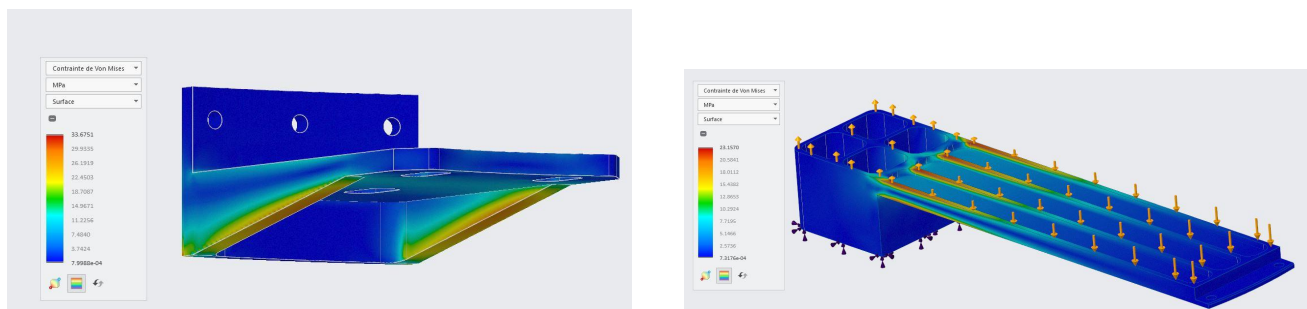
faire apparaître un éventuel rodage, une usure ou une dérive. La position fermée sera contrôlée mécaniquement et par les capteurs.

Des essais seront ensuite menés aux températures limites jugées pertinentes pour le mécanisme. L'objectif est de vérifier les effets de dilatation différentielle, de lubrification, de rigidité des joints et de comportement du moteur. Un système qui fonctionne à température ambiante mais dont le tiroir se bloque après refroidissement ne peut pas être considéré comme qualifié. Les jeux seront donc définis à partir des matériaux réels et non d'une marge géométrique arbitraire.

La fermeture fera l'objet d'une vérification spécifique après vibration. Le module sera placé en configuration représentative, avec masses et câbles installés. Après l'essai, aucune intervention ne devra être nécessaire avant un nouveau cycle fonctionnel. Cette séquence est plus représentative qu'un essai de vibration d'une pièce isolée, car elle vérifie en même temps le maintien des connecteurs, la position des capteurs et la capacité du tiroir à se déplacer.

Le profil de vibration applicable sera défini à partir des exigences REXUS et de la phase de revue correspondante. Les accélérations de dimensionnement incluent des pointes de l'ordre de 20 g et la rotation du véhicule [1]. Les fréquences propres de la structure seront estimées par calcul puis vérifiées lorsque cela est possible afin d'éviter une résonance critique dans la bande excitée par le lanceur.

Les essais ne chercheront pas uniquement à démontrer qu'aucune pièce ne casse. Ils devront aussi vérifier que la géométrie scientifique ne change pas. Un déplacement de quelques millimètres d'un capteur de position ou une déformation permanente de la trappe peut suffire à rendre la fermeture incertaine. Des mesures dimensionnelles avant et après essai seront donc associées au contrôle fonctionnel.



(a) Exemple de zone de fixation étudiée.

(b) Exemple de barre structurale étudiée.

Figure 3.9 – Les simulations structurales servent à choisir les zones instrumentées et les cas d'essai, puis sont mises à jour avec la configuration réelle.

Les cas représentés figure 3.9 montrent deux niveaux différents de vérification : une zone de fixation locale et une pièce qui transmet l'effort sur une plus grande longueur. Les concentrations de contraintes indiquées par les simulations servent à choisir les points où une déformation, un jeu ou un desserrage serait le plus pénalisant. **Après vibration, l'inspection et les mesures dimensionnelles se concentreront donc sur ces zones afin de vérifier que l'essai réel reste cohérent avec les hypothèses du modèle FEA.**

3.5.2 Environnement et supports

La baisse de pression peut modifier la dissipation thermique, le comportement de certains matériaux et la force nécessaire au mouvement. Un essai en enceinte basse pression permettra de faire fonctionner le mécanisme et l'électronique dans un environnement représentatif de la phase scientifique. La température sera mesurée à plusieurs points afin de vérifier qu'aucun composant ne dépasse sa plage et que les gradients n'entraînent pas de déformation problématique.

La pression seule n'est pas un essai de contamination. Pour évaluer la propreté, le module sera cyclé avec des témoins propres placés aux emplacements de collecte. Après plusieurs séquences, ces témoins seront observés selon le même protocole que les supports scientifiques. Cette expérience donnera une mesure du fond créé par le mécanisme lui-même : usure, frottement, lubrifiant, poussière métallique ou fragments de joint.

Les premiers aérogels seront caractérisés avant de subir des essais de vibration et de manipulation. La présence de fissures, pertes de matière ou poudrage sera quantifiée. Des particules analogues de taille et de densité connues seront ensuite projetées à des vitesses représentatives des scénarios d'impact accessibles au laboratoire. Le but est de relier la profondeur de piste et l'état du résidu aux paramètres du modèle.

Les mêmes échantillons seront observés avec les techniques prévues après le vol. Un matériau n'est validé que si la particule peut être retrouvée et analysée, pas uniquement si elle est arrêtée. Les blancs de fabrication et de manipulation seront mesurés en parallèle afin de connaître le fond initial de Fe, Mg, Si, Ni ou d'autres éléments susceptibles d'être utilisés pour l'identification.

3.5.3 Flight Simulation Test et interfaces

Avant livraison, une séquence complète reproduira le déroulement de la mission : mise en configuration, attente, événement d'ouverture simulé, mouvement, acquisition des données, phase d'exposition, événement de fermeture, retour en position sûre, puis récupération des fichiers. Des défauts seront volontairement injectés : capteur incohérent, délai dépassé, interruption de communication ou anomalie d'alimentation. L'objectif est de vérifier que le système adopte un comportement défini et que l'événement reste visible dans le journal.

Cette logique est cohérente avec le *Flight Simulation Test* demandé dans le cycle REXUS [1, 3]. Le FST ne sera pas traité comme une démonstration préparée pour la revue, mais comme la répétition d'une procédure déjà exécutée sur le système intégré. Après cette étape, toute modification matérielle ou logicielle devra être limitée et accompagnée d'une vérification ciblée.

Un essai réussi sur un composant ne démontre pas automatiquement que l'expérience est prête à voler. Un moteur peut fonctionner seul et manquer de marge une fois couplé au joint ; un capteur peut être précis sur table et devenir inexploitable lorsqu'il partage l'alimentation avec l'actionneur ; un aérogel peut survivre à une vibration isolée mais se fissurer après montage dans son logement. La qualification doit donc progresser du composant vers la fonction puis vers le système intégré, conformément à la logique de vérification attendue pour une expérience REXUS [1, 30].

Pour chaque exigence importante, nous définissons d'abord ce qui constituerait une preuve suffisante. Pour la fermeture, le critère combine la commande moteur et la preuve de position : la position fermée doit être confirmée, la consommation rester dans la plage prévue, le mécanisme ne doit pas présenter de dommage et la barrière particulière doit conserver son efficacité. Pour la chaîne de données, un fichier présent sur la carte mémoire ne suffit pas : il doit contenir les événements attendus, être horodaté de manière cohérente et rester lisible après les coupures ou transitoires représentatifs. Pour les supports, survivre mécaniquement n'est qu'une partie du critère ; le fond analytique et la possibilité de retrouver un impact doivent également être vérifiés.

Cette définition préalable des critères évite un biais fréquent : adapter après coup la conclusion à ce que l'essai a réussi à mesurer. Elle permet aussi d'identifier les moyens nécessaires avant la campagne. Si un essai doit démontrer une marge de couple, il faut mesurer courant, déplacement et effort ou disposer d'une méthode équivalente ; si un essai doit démontrer la propreté, il faut avoir préparé des témoins et une méthode d'analyse avant l'exposition.

3.5.4 Tester les interfaces dans les deux sens

Les interfaces sont testées non seulement pour vérifier qu'elles transmettent correctement une fonction, mais aussi pour vérifier qu'elles ne créent pas un nouveau problème. L'alimentation doit fournir l'énergie au moteur sans réinitialiser le calculateur. Le support mécanique doit tenir le collecteur sans transmettre une contrainte qui fissure l'aérogel. Le logiciel doit fermer le tiroir sur un événement de fin de fenêtre sans réagir à un bruit transitoire comme à une commande réelle. Le conditionnement doit protéger l'échantillon sans introduire un contaminant qui dominerait l'analyse.

Cette approche conduit naturellement à des essais couplés. Un cycle d'ouverture-fermeture est répété avant et après vibration ; la chaîne d'enregistrement fonctionne pendant le mouvement ; les capteurs sont lus pendant un essai basse pression ; les supports montés sont soumis à une séquence représentative de manipulation puis analysés. Plus la configuration se rapproche du vol, plus le test doit reproduire les interactions réellement présentes.

Le Flight Simulation Test est l'aboutissement de cette progression. Il ne cherche pas à reproduire toutes les contraintes physiques simultanément, mais à exécuter la chronologie fonctionnelle de la mission avec les interfaces et les signaux représentatifs. Les états du logiciel, les commandes moteur, les transitions, les délais et le journal de données sont alors évalués comme une seule séquence. Les scénarios de défaut les plus importants sont injectés pour vérifier que le système converge vers un état sûr plutôt que vers une succession d'actions imprévisibles.

3.5.5 Conserver la preuve

Chaque résultat de test sera lié à une configuration identifiable : version de la CAO, lot de matériau, version logicielle, références des capteurs et paramètres de commande. Cette traçabilité n'est pas une formalité documentaire. Elle empêche d'utiliser, pour qualifier une configuration finale, un résultat obtenu sur un prototype qui ne possède plus le même joint, la même masse mobile ou le même logiciel.

Les données brutes, photographies, courbes et comptes de cycles seront conservés avec le résultat synthétique. Lorsqu'un essai échoue, **le résultat est conservé comme une information de conception** : le mode de défaillance est analysé, la conception est modifiée et le périmètre du nouvel essai est défini. Cette boucle conception-essai-correction est précisément ce qui transforme une architecture préliminaire en expérience démontrée.

Le même principe s'applique à la science. Une campagne d'impact sur analogues doit conserver la taille et la composition des projectiles, la vitesse mesurée, le lot d'aérogel et la méthode d'observation. Sans ces informations,

une belle piste d'impact ne peut pas être utilisée pour calibrer un modèle. La qualification technique et la validation scientifique suivent donc la même discipline : une preuve n'est utile que si son domaine de validité est connu.

4 Conformité au programme REXUS

4.1 Enveloppe mécanique et ouverture en vol

La compatibilité mécanique commence par l'enveloppe du module. REXUS utilise des modules de diamètre extérieur 355,6 mm ; la configuration COSMIC est développée dans une hauteur nominale de 220 mm [1]. Le carter, l'actionneur, les batteries, l'électronique et la cassette scientifique sont intégrés dans cette enveloppe avec une trappe affleurante en position fermée. L'analyse CAO/FEA actuelle donne un déport maximal d'environ 0,2 mm, inférieur au critère de 0,5 mm vers l'intérieur utilisé pour l'interface de trappe.

L'ouverture pendant le vol constitue une interface particulièrement sensible. Le manuel REXUS encadre la géométrie des trappes et traite les mécanismes actionnés en vol comme des éléments à analyser avec les responsables du véhicule [1]. La conformité de COSMIC sera donc démontrée avec trois éléments : plan d'enveloppe en positions fermée et ouverte, calcul des efforts et réactions transmis à la structure, puis validation formelle de l'interface dans le processus REXUS applicable. La géométrie ouverte utilisée en CFD sera identique à la géométrie présentée pour cette revue.

Les assemblages structuraux sont repris par le carter et les platines, sans faire porter les charges de lancement par l'aérogel ou les grilles scientifiques. La visserie critique est sécurisée contre le desserrage et le chemin des câbles est contraint sur toute la course. Après fabrication, un contrôle dimensionnel vérifiera le débattement, la position de la trappe, les interfaces de fixation et l'absence d'interférence avant l'essai vibratoire.

4.2 Charges, vibration et environnement thermique

Le dimensionnement structurel utilise un cas longitudinal à 20g, cohérent avec les niveaux de conception décrits pour REXUS [1]. Les résultats FEA du tableau 3.2 montrent des marges supérieures à deux sur les pièces principales de la configuration corrigée. **La preuve finale associera calcul et essai :** inspection dimensionnelle avant vibration, excitation selon le profil de qualification applicable, nouveau cycle complet d'ouverture-fermeture, puis inspection des fixations, du guidage et des supports.

La température est traitée comme une enveloppe de fonctionnement plutôt que comme une valeur unique. La peau externe du véhicule peut subir un échauffement important, notamment pendant la rentrée, tandis que l'expérience connaît également des phases froides au sol et en altitude [1]. Le collecteur est fermé avant la descente dans les couches denses, ce qui protège directement les supports ; le carter et l'électronique doivent néanmoins supporter l'histoire thermique du module. Les essais prévus combinent basse pression, température et cycles mécaniques afin de vérifier simultanément jeux, joints, motorisation et capteurs.

La dépressurisation du module impose une conception adaptée des volumes fermés. Les cavités et joints seront analysés pour éviter une différence de pression susceptible de charger inutilement la trappe ou de perturber le mouvement. L'essai en enceinte basse pression mesurera le temps de déplacement, le courant moteur, la répétabilité des positions et l'état des joints. **La conformité sera ainsi attachée à des grandeurs mesurées plutôt qu'à une simple déclaration de compatibilité.**

4.3 Interface électrique, RXSM et radio-silence

L'expérience est raccordée au système de service REXUS par l'interface prescrite dans le manuel et la documentation de campagne. La chaîne logique reçoit une alimentation régulée ; la motorisation est isolée autant que possible afin que ses transitoires de courant restent sans effet sur le calculateur et les capteurs. L'Electrical Interface Test vérifiera le brochage, les tensions, les protections, les courants de pointe, les retours de masse et le comportement lors des commandes de service.

La radio-silence impose un état électrique réellement maîtrisé. Si une source autonome est embarquée, son architecture intégrera un moyen de coupure compatible avec les règles REXUS afin que l'expérience puisse être rendue totalement inactive pendant les phases imposées [1]. Le logiciel ne constitue donc jamais l'unique barrière d'inhibition. Le passage de l'état SAFE à l'état armé sera observable et enregistré.

Les essais électriques seront effectués avec la motorisation active, car c'est dans cette condition que les perturbations sont maximales. Les critères de réussite incluent l'absence de réinitialisation, la conservation du journal, la stabilité

des mesures et l'absence de commande parasite. Si les mesures mettent en évidence un couplage, le routage, les filtres ou les protections seront modifiés puis retestés.

4.4 Sécurité fonctionnelle et comportement en défaut

La philosophie de sûreté privilégie un état mécanique stable et une séquence traçable. Le tiroir reste fermé pendant les phases non scientifiques. Une ouverture n'est autorisée que lorsque les conditions de mission sont réunies. Chaque mouvement possède une durée maximale ; les capteurs de position et l'encodeur sont comparés ; une incohérence crée un défaut horodaté. La fermeture reçoit la priorité à la fin de la fenêtre scientifique.

Le tableau 4.1 associe les défaillances principales à une réponse concrète. Cette présentation décrit directement *comment* le risque est traité, conformément à l'objectif d'une revue REXUS.

Table 4.1 – Principaux modes de défaillance et réponses de conception.

Événement	Conséquence	Réponse mise en place
Tiroir bloqué fermé	absence de prélèvement	arrêt à durée maximale, journalisation, aucun effort moteur prolongé
Tiroir bloqué ouvert	contamination et risque mécanique	ordre de rétraction prioritaire, marge de poussée, surveillance position/courant
Perte d'un capteur de position	état incomplet	comparaison fin de course, Hall, encodeur et temps de mouvement
Desserrage d'un assemblage	jeu ou pièce libre	freinage mécanique de la visserie, inspection et essai vibratoire
Perte d'alimentation moteur	mouvement interrompu	auto-maintien de la transmission et état physique conservé
Réinitialisation calculateur	perte de séquence	séparation de puissance, watchdog, démarrage en état conservateur
Rupture d'un support scientifique	contamination interne	maintien mécanique, qualification vibration, inspection avant et après vol

4.5 Plan de conformité et Flight Requirements Plan

Le FRP transformera les besoins de l'expérience en paramètres propres au vol : profil d'altitude, temps des événements, interfaces disponibles et conditions opérationnelles [1]. Les seuils scientifiques restent exprimés en altitude ; les délais et signaux de commande seront calculés lorsque le profil officiel sera disponible. Cette séparation permet de conserver une architecture stable tout en adaptant la chronologie à la mission réellement attribuée.

Le tableau 4.2 synthétise les points qui seront présentés à REXUS. **Sa colonne « preuve » répond directement à la question centrale d'une revue : comment démontrer que la contrainte est respectée ?** Les statuts « calculé », « à tester » ou « à figer » décrivent la maturité actuelle et évitent de confondre conception préliminaire et qualification.

Table 4.2 – Synthèse de conformité : exigence, réponse et preuve attendue.

Point	Réponse COSMIC	Preuve	Statut
Enveloppe module	intégration dans 355,6 mm de diamètre, hauteur de référence 220 mm	CAO + contrôle dimensionnel	calculé
Trappe fermée	déport calculé $\approx 0,2$ mm	FEA + mesure sur matériel	calculé / à mesurer
Charges	structure calculée à 20g, marges du tableau 3.2	FEA + vibration	calculé / à tester
Masse	valeur conservatrice 9,543 kg ; BOM détaillée 9,272 kg	réconciliation + pesée	à figer
Mouvement	course 164 mm, mouvement cible ~ 4 s	cycles en air et basse pression	à tester
Fermeture	vis-écrou, effort axial, joints, capteurs diversifiés	cycles + contamination + défauts	à tester
Électrique	logique régulée, motorisation séparée, état SAFE matériel	EIT + transitoires	à tester
Chronologie	ouverture/fermeture recalées sur FRP	FST + revue logicielle	à figer avec FRP

La version suivante du SED mettra à jour cette table à partir des preuves réellement obtenues. Le document restera ainsi un rapport de conception et de validation : chaque affirmation importante renvoie à une grandeur, un calcul, un essai ou une interface formellement identifiée.

5 Après le vol : de l'échantillon au résultat

5.1 Récupération et chaîne de possession

La récupération prolonge directement le protocole scientifique. Le module est d'abord photographié et inspecté dans son état de retour. Les données brutes sont copiées avant toute intervention sur la zone de collecte. Le carter fermé est ensuite conditionné pour le transfert vers le laboratoire ; l'ouverture scientifique est réalisée dans un environnement contrôlé avec enregistrement des personnes, outils, témoins et contenants utilisés.

Chaque cassette, grille, fragment d'aérogel et témoin possède un identifiant unique. La chaîne de possession conserve les changements de contenant, les ouvertures, les extractions et les analyses. Cette traçabilité permet de relier un objet observé au microscope à sa position dans le collecteur, à l'historique du vol et au fond de contamination correspondant.

L'analyse suit un ordre allant des méthodes les moins destructives vers les plus invasives. La première étape consiste à inspecter les supports à faible grossissement et à cartographier les zones présentant des traces, des impacts ou des dépôts. Sur l'aérogel, la forme et l'orientation d'une piste peuvent fournir une première indication sur la direction d'arrivée et l'énergie relative de l'impact. Sur les supports minces, la distribution spatiale des dépôts peut être comparée aux cartes de probabilité de capture obtenues par simulation.

La microscopie électronique à balayage permet ensuite d'observer la morphologie à plus forte résolution. Elle est particulièrement utile pour distinguer une particule compacte, un agrégat, un fragment métallique ou un débris de matériau. L'imagerie ne suffit toujours pas à conclure sur l'origine, mais elle permet de sélectionner les objets pertinents pour l'analyse chimique et d'éviter de consacrer des techniques plus coûteuses à des contaminants évidents.

L'EDS fournit une cartographie élémentaire locale. L'association Fe–Mg–Si–O, par exemple, peut être compatible avec une matière météoritique transformée, mais elle doit être comparée au fond des supports, aux matériaux présents dans le module et aux témoins. Un élément détecté dans une particule n'est pas interprété isolément : la morphologie, la localisation et la co-occurrence d'éléments sont examinées ensemble.

5.2 Analyses morphologiques et chimiques

La spectroscopie Raman ou FTIR peut compléter l'EDS en donnant accès à certaines liaisons, phases ou familles de composés. Ces techniques sont particulièrement intéressantes lorsque deux matériaux présentent une composition élémentaire proche mais une structure chimique différente. Leur utilisation dépendra

de la taille du résidu, du support et de l'intensité du signal. L'aérogel lui-même possède une signature qu'il faudra caractériser avant le vol afin d'éviter de confondre le fond du substrat avec celui d'une particule.

L'analyse isotopique représente un niveau supplémentaire de preuve, mais elle est plus exigeante. Elle ne sera engagée que si la masse récupérée, la taille des objets et l'accès instrumental rendent la mesure pertinente. L'objectif n'est pas d'afficher une technique prestigieuse dans le plan d'analyse, mais de l'utiliser uniquement lorsqu'elle peut réellement réduire l'ambiguïté sur l'origine. Dans un échantillon très faible, une analyse destructive mal choisie pourrait supprimer un objet sans produire une information exploitable.

Une conclusion construite par faisceau d'indices

Aucune méthode ne sera considérée comme preuve unique. La classification d'une particule reposera sur la cohérence entre sa morphologie, sa composition, sa position sur le collecteur, l'état des témoins, la chronologie du vol et, lorsque possible, une information spectroscopique ou isotopique.

Lorsque l'analyse d'une piste nécessite une extraction, l'objectif est de conserver le trajet et le résidu avec le minimum de contamination. Les techniques développées pour Stardust, notamment les « keystones », montrent qu'il est possible de découper un petit volume d'aérogel autour d'une piste sans détruire l'ensemble de la géométrie [17, 19]. L'adaptation à COSMIC devra tenir compte de la taille attendue des impacts et des moyens disponibles.

Avant toute extraction, la piste sera photographiée et repérée dans le référentiel du plateau. La découpe sera réalisée avec des outils dont le matériau est connu et contrôlé. Un blanc de procédure, c'est-à-dire une extraction réalisée sur une zone sans impact apparent, permettra d'identifier ce que l'outil ou la manipulation peut ajouter au signal. Cette précaution devient essentielle lorsque la quantité de matière recherchée est comparable à la contamination introduite par une seule manipulation.

L'analyse quantitative pourra utiliser la cartographie du plateau comme une grille. Chaque zone sera associée à une aire, un type de support et une probabilité de capture prédite. Le nombre de candidats observés dans une zone pourra alors être comparé au nombre attendu relativement aux autres zones, sans nécessiter immédiatement une estimation absolue de la concentration atmosphérique. Cette comparaison interne est particulièrement robuste lorsque la concentration globale est mal connue.

Si le nombre de candidats est suffisant, la distribution de taille sera corrigée, au moins qualitativement, par l'efficacité de capture calculée en fonction du rayon. Une population observée dominée par les particules les plus grandes peut résulter de la population réelle, mais aussi du fait que les petites particules suivent l'écoulement et sont moins interceptées. **Le modèle servira donc à distinguer ces deux explications.**

La vitesse d'impact pourra également être reliée à la morphologie des pistes dans l'aérogel. Cette relation restera d'abord qualitative, car la géométrie d'une piste dépend de plusieurs paramètres. Des essais d'impact avec analogues fourniront néanmoins une bibliothèque de référence. Une piste de vol pourra être comparée à des cas connus plutôt qu'interprétée sur la base d'une formule unique.

Lorsque plusieurs techniques donnent des résultats partiellement contradictoires, la conclusion conservera cette ambiguïté. Une morphologie compatible mais une composition dominée par un alliage du module conduira à un classement prudent. À l'inverse, une composition compatible mais sans structure d'impact identifiable pourra rester un candidat faible. Cette transparence est essentielle pour que les données puissent être réutilisées par d'autres chercheurs.

L'ensemble des données analytiques sera enfin relié aux conditions de vol par des identifiants et non par une reconstruction manuelle. L'objectif est de pouvoir passer d'une particule observée au microscope à sa position sur le plateau, puis à la zone de capture simulée et à la période de vol correspondante. C'est ce lien qui transforme une collection d'images en expérience physique.

5.3 Attribution et niveau de preuve

L'analyse post-vol est organisée comme une succession de questions scientifiques. Les instruments interviennent uniquement lorsqu'ils permettent de répondre à l'étape suivante de cette chaîne. La première est simplement : *y a-t-il un objet qui n'était pas présent sur les témoins ?* Viennent ensuite sa morphologie, sa composition élémentaire, sa structure chimique et, si la quantité de matière le permet, des informations isotopiques. À chaque étape, la mesure suivante n'est engagée que si elle apporte une information nouvelle sans compromettre inutilement l'échantillon.

L'observation optique et électronique fournit d'abord la géométrie. Dans l'aérogel, la présence d'une piste cohérente avec un impact constitue une information différente d'un dépôt posé en surface lors d'une manipulation. La longueur, l'orientation, la forme et la position de cette piste peuvent être comparées avec les essais d'analogues et avec les conditions de capture calculées. Sur un support mince, la morphologie du dépôt, son éventuelle

fragmentation et sa relation avec le maillage fournissent d'autres indices. Ces observations ne suffisent pas à déterminer une origine, mais elles éliminent déjà une partie des contaminants évidents.

Le MEB associé à l'EDS ajoute ensuite la composition élémentaire locale. Les éléments métalliques et silicatés attendus dans la matière météorique peuvent être recherchés, tout en gardant à l'esprit que le support lui-même contribue au spectre et que plusieurs matériaux terrestres présentent des compositions voisines. Une détection de fer, de magnésium et de silicium n'est donc pas une preuve automatique d'origine extraterrestre. Elle devient plus intéressante lorsqu'elle est cohérente avec la morphologie, avec l'absence du même signal sur les blancs et avec d'autres signatures mesurées sur le même objet [22, 13].

Raman et FTIR peuvent compléter cette lecture en donnant accès aux liaisons et aux phases moléculaires lorsque la taille et le support le permettent. Ils sont particulièrement utiles pour distinguer des matériaux présentant des éléments similaires mais des structures différentes. Là encore, le fond doit être mesuré sur des zones vierges du même matériau. Les spectres acquis avant vol sur les supports de référence constitueront une base de comparaison afin que les changements observés après le vol ne soient pas interprétés hors contexte.

L'analyse isotopique se situe à un niveau encore plus exigeant. Elle peut apporter une information forte sur la compatibilité d'une particule avec certaines origines, mais elle demande une masse suffisante, une préparation maîtrisée et un instrument adapté. Elle ne sera donc pas présentée comme une étape garantie pour chaque particule. Si le prélèvement offre des objets suffisamment grands et propres, cette analyse pourra être menée sur un sous-ensemble choisi après les étapes non destructives. Dans le cas contraire, conserver l'échantillon pour une analyse ultérieure sera préférable à une préparation destructive sans pouvoir discriminant suffisant.

5.3.1 Construire une classification par convergence d'indices

Au terme de cette chaîne, l'origine d'une particule sera attribuée par convergence d'indices, jamais à partir d'un seul critère. Chaque objet sera associé à un ensemble d'indices : contexte de capture, morphologie, trajectoire dans le support, composition, structure chimique, présence ou absence sur les témoins et éventuelle signature isotopique. Une classification pourra alors distinguer au minimum les contaminants probables, les objets indéterminés et les candidats compatibles avec une origine météoritique.

Cette méthode est plus exigeante qu'un simple comptage, mais elle protège le projet contre le résultat le plus trompeur : produire un nombre précis d'objets dont l'identité est mal établie. Elle permet aussi de conserver l'incertitude au niveau où elle existe réellement. Un objet peut être très probablement exogène sans que son altitude précise soit connue ; un autre peut être capturé pendant la bonne fenêtre mais rester chimiquement ambigu. Ces deux situations ne doivent pas être fusionnées dans une même catégorie de confiance.

Les témoins sont intégrés à cette classification dès le début. Un témoin fermé renseigne sur la fabrication et le stockage ; un témoin qui suit certaines manipulations renseigne sur la préparation et l'ouverture ; des zones vierges du support renseignent sur le fond local. Si un contaminant apparaît simultanément sur plusieurs témoins et sur la zone exposée, il devient possible de le reconnaître et d'éviter de l'attribuer au vol. Cette logique est directement inspirée des exigences de contrôle de contamination des missions de retour d'échantillons [26, 27, 31].

Enfin, les résultats analytiques seront reliés au modèle de capture. La distribution des tailles et des morphologies observées sera comparée aux classes de particules que l'aérodynamique prédit comme interceptables. Un accord ne prouvera pas à lui seul le modèle, mais il donnera une cohérence supplémentaire à l'interprétation. Un désaccord sera tout aussi intéressant : il pourra révéler une population mal représentée, un biais de capture ou une hypothèse aérodynamique à revoir. C'est dans ce dialogue entre échantillon et modèle que le vol prend sa pleine valeur scientifique.

Une non-détection peut avoir plusieurs causes : concentration atmosphérique faible, efficacité de capture faible, particules trop petites pour être distinguées du fond, perte lors de la récupération ou contamination rendant l'identification impossible. **La valeur scientifique d'un résultat nul dépendra donc de notre capacité à éliminer certaines de ces hypothèses.**

Si le mécanisme est confirmé ouvert pendant la bonne fenêtre, si les témoins sont propres et si les simulations prédisent une efficacité de capture quantifiée, l'absence d'un signal mesurable contraindra le produit entre concentration et rendement. Si, au contraire, la position du plateau est incertaine, la non-détection ne permettra pas de distinguer une atmosphère pauvre d'une expérience restée fermée. Cette différence explique pourquoi la traçabilité a été placée au cœur de l'architecture.

5.4 Interprétation quantitative et incertitudes

Le résultat final combine trois familles d'incertitude. La première vient de l'environnement : concentration réelle, distribution de tailles, vitesse relative et orientation pendant la fenêtre. La deuxième vient du transfert vers le collecteur : déviation par l'écoulement, impact, rétention et éventuelle fragmentation. La troisième vient

de l'analyse : seuil de détection, fond du support, contamination et classification des candidats. Le budget d'incertitude conserve ces contributions séparées avant de les combiner.

La quantité la plus robuste à court terme sera la densité de dépôts observés sur les zones cartographiées, accompagnée du fond mesuré sur les témoins. Le passage à une concentration atmosphérique demandera l'aire effective et le rendement de capture issus des modèles et essais. Les résultats seront donc publiés avec leur niveau de dépendance au modèle : observation directe, grandeur reconstruite ou grandeur inférée.

Une non-détection reste interprétable lorsque la fenêtre d'exposition, le fonctionnement du mécanisme et la sensibilité analytique sont connus. Elle fournit alors une limite sur le produit entre concentration et efficacité de capture dans les conditions du vol. À l'inverse, une anomalie majeure de fermeture ou de contamination peut rendre certaines conclusions impossibles ; le journal permet de l'identifier explicitement.

5.5 Résultats attendus et valorisation

Le premier résultat attendu est un jeu d'échantillons documentés : cartes de dépôts, images de pistes, morphologies, compositions élémentaires et, selon les cas, signatures Raman/FTIR ou isotopiques. **Le second est une reconstruction physique de la collecte reliant ces observations au profil de vol.** **Le troisième est une validation expérimentale du concept de prélèvement rétractable et protégé dans l'environnement d'une fusée-sonde.**

Ces résultats intéressent plusieurs communautés : physique et chimie de la haute atmosphère, science des poussières, instrumentation suborbitale, matériaux de capture et ingénierie des petits systèmes spatiaux. Les partenaires scientifiques pourront intervenir sur la caractérisation des matériaux, les moyens d'analyse et l'interprétation. Les partenaires techniques pourront exploiter le retour d'expérience sur le mécanisme, les essais et l'intégration.

La diffusion suivra deux niveaux. Les résultats scientifiques seront structurés pour être présentables sous forme de rapport, poster, communication ou article lorsque leur maturité le permettra. La médiation expliquera le parcours complet de l'expérience - de la matière météoritique au laboratoire - avec l'appui de ScienceLab 22 et des canaux de communication du projet. Cette valorisation restera séparée de la chaîne de preuve : une image spectaculaire ou un candidat intéressant sera communiqué avec le niveau de certitude réellement atteint.

6 Conclusion

Au terme de ce document, l'ambition de COSMIC peut finalement se résumer assez simplement : **profiter d'un vol REXUS pour aller chercher dans la haute atmosphère une matière que nous observons encore principalement à distance, puis la ramener au laboratoire pour pouvoir l'étudier directement.**

Tout le développement de l'expérience découle de cette idée. Il ne s'agit pas seulement de construire un collecteur capable de s'ouvrir au bon moment, mais de faire en sorte que l'échantillon récupéré ait réellement une valeur scientifique. Cela suppose de comprendre ce qui peut atteindre le module pendant le vol, de préserver cette matière au moment de sa capture, de connaître les conditions dans lesquelles elle a été prélevée et, enfin, de pouvoir l'identifier une fois revenue au sol. **La physique, la mécanique, les matériaux, le système embarqué et les analyses post-vol répondent ainsi à une même question.**

Le projet est encore en développement et plusieurs choix devront être confirmés par les simulations, les prototypes et les essais à venir. C'est précisément l'objectif des prochaines étapes : transformer les solutions aujourd'hui définies en un système suffisamment maîtrisé pour que le résultat du vol puisse être interprété avec confiance. Le défi n'est donc plus seulement de montrer que l'expérience peut fonctionner, mais de démontrer progressivement **pourquoi elle fonctionnera et ce que nous pourrions réellement apprendre de ce qu'elle rapportera.**

Si COSMIC atteint cet objectif, son intérêt dépassera la seule récupération de quelques particules. L'expérience permettra également de mieux comprendre les conditions dans lesquelles cette matière peut être collectée et étudiée, et constituera une première base pour imaginer d'autres prélèvements dans des régions de l'atmosphère encore difficiles d'accès.

7 Exigences scientifiques et techniques

Cette matrice traduit la chaîne de mesure en exigences vérifiables. Elle rassemble les exigences qui structurent directement la conception de COSMIC ; les exigences complètes du programme REXUS restent portées par le manuel applicable, les documents de campagne et la matrice d'interface. Les valeurs dépendantes du vol seront actualisées avec les documents de mission applicables, sans changer la logique de vérification.

ID	Exigence	Justification	Vérification
SCI-01	Les surfaces scientifiques doivent être protégées avant l'entrée dans la fenêtre de prélèvement.	limiter le fond	inspection, témoin, essai contamination
SCI-02	Le début et la fin de l'exposition doivent être reconstruits avec une incertitude compatible avec l'analyse de performance.	relier dépôt et vol	journal événementiel + position
SCI-03	Au moins un témoin protégé doit suivre la chaîne de fabrication, d'intégration, de vol et de récupération.	distinguer signal et fond	inspection et analyse témoin
SCI-04	La position de chaque zone de collecte doit être connue dans le référentiel du module.	comparer aux trajectoires	CAO + cartographie post-vol
SCI-05	Le matériau de capture de référence doit être caractérisé avant le vol.	interpréter impact et fond	densité, dimensions, essais mécaniques, fond analytique
SCI-06	Les analyses post-vol doivent commencer par des méthodes non destructives avant toute préparation irréversible.	préserver l'information	procédure d'analyse
SCI-07	Toute attribution d'origine météoritique doit reposer sur plusieurs indices indépendants.	éviter les faux positifs	protocole de classification
SCI-08	Le dimensionnement doit viser au moins 200 particules exploitables, soit un seuil de planification de 400 particules collectées et une cible de confort de 600 à 750.	permettre la chaîne analytique	modèle de performance + comptage post-vol
PHY-01	Le modèle de performance doit distinguer concentration, interception, rétention et identification.	rendre l'incertitude lisible	revue de calcul
PHY-02	Les trajectoires doivent être calculées pour plusieurs tailles et densités de particules.	distribution réelle	étude paramétrique
PHY-03	L'influence de l'écoulement autour du module ouvert doit être évaluée.	aire effective	CFD + trajectoires
PHY-04	Les hypothèses de continuum ou de raréfaction doivent être justifiées par les échelles considérées.	validité du modèle	calcul de Knudsen
MEC-01	Le mécanisme doit rester fermé pendant les phases non scientifiques.	contamination et sécurité	essai fonctionnel + capteurs
MEC-02	Le mécanisme doit pouvoir effectuer un cycle ouverture-fermeture après vibration.	robustesse	essai vibration puis cycle
MEC-03	La fermeture doit être mécaniquement stable sans commande continue.	sécurité	inspection conception + essai
MEC-04	Aucun élément ne doit pouvoir devenir pièce libre pendant le vol.	sécurité véhicule	analyse + inspection + vibration
MEC-05	Les propriétés de masse de l'expérience intégrée doivent être mesurables dans le référentiel REXUS.	intégration	pesée et mesure CG
MAT-01	Les supports doivent rester intacts sous les charges de qualification.	préserver l'échantillon	vibration + inspection
MAT-02	Le fond chimique des supports doit être documenté.	interprétation EDS/Raman	blancs pré-vol
MAT-03	Les opérations de fabrication et de manipulation doivent être traçables par lot et identifiant.	reproductibilité	dossier de lot
ELE-01	L'état fermé et l'état ouvert doivent être observables par plus d'une information cohérente.	éviter l'état indéterminé	fin de course + Hall/encodeur

ID	Exigence	Justification	Vérification
ELE-02	Les commandes et changements d'état doivent être horodatés en mémoire non volatile.	reconstruire le vol	test de mission
ELE-03	Une perturbation de la motorisation ne doit pas provoquer de perte non détectée de la logique.	fiabilité	essai alimentation/transitoires
ELE-04	Le système doit entrer dans un état conservateur en cas d'incohérence critique.	sécurité	injection de défauts
OPS-01	Le module récupéré doit être documenté avant ouverture scientifique.	contamination	procédure récupération
OPS-02	Les supports doivent être transférés dans des contenants identifiés avant analyse.	chaîne de possession	procédure et enregistrement
OPS-03	Une copie brute des données doit être conservée avant traitement.	traçabilité	contrôle fichier et somme de contrôle
VER-01	Toute exigence critique doit être associée à une méthode de vérification avant gel de conception.	maîtrise du développement	matrice de vérification

La matrice sera maintenue comme un lien entre le texte et les essais. Une exigence n'est pas considérée comme close parce qu'une décision a été prise ; elle l'est lorsque la preuve prévue existe sur une configuration identifiée. Cette règle permet de maintenir un document unique même lorsque plusieurs essais sont réalisés à des moments différents.

8 Grandeurs physiques et paramètres de modèle

Variables de trajectoire

Les grandeurs suivantes sont nécessaires pour transformer le profil de vol en conditions de capture : altitude $z(t)$, vitesse du véhicule $\mathbf{V}(t)$, vitesse angulaire, température atmosphérique $T(t)$, pression $p(t)$, densité $\rho_g(t)$ et orientation du collecteur. Le profil officiel du vol constitue la référence ; les vols précédents servent uniquement à dimensionner et tester avant disponibilité de cette référence.

Table 8.1 – Paramètres utilisés par le modèle de performance.

Grandeur	Symbole	Rôle	Origine
Altitude	z	propriétés atmosphériques, fenêtre	profil de vol
Vitesse relative	v_{rel}	volume balayé, impact	trajectoire + écoulement
Densité du gaz	ρ_g	traînée particulaire	atmosphère/CFD
Température du gaz	T	vitesse moléculaire, Mach	atmosphère
Concentration	n	population disponible	littérature/modèle
Rayon particule	r_p	inertie, traînée, détection	distribution paramétrique
Densité particule	ρ_p	inertie, impact	littérature/hypothèses
Aire effective	A_{eff}	alimentation réelle du support	trajectoires
Rétention	η_r	fraction restant sur support	essais d'impact
Identification	η_a	fraction analysable	campagne analytique

Nombres sans dimension

Le nombre de Mach $M = V/a$ indique l'importance de la compressibilité à l'échelle du véhicule. Le nombre de Knudsen $Kn = \lambda/L$ indique si l'hypothèse de continuum est adaptée à l'échelle considérée. Le nombre de Stokes compare le temps de réponse d'une particule au temps caractéristique de l'écoulement. Ces trois nombres répondent à des questions différentes ; les utiliser ensemble évite de qualifier tout le vol par un seul mot comme « supersonique » ou « raréfié ».

Dans la zone de 60 km à l'apogée, le Mach évolue fortement parce que la vitesse du véhicule varie. Le Knudsen évolue également avec la densité atmosphérique. À l'échelle nanométrique, le modèle de force sur les particules peut

entrer dans un régime moléculaire alors que certaines structures de l'écoulement global restent encore approchables par des méthodes continues corrigées. La simulation finale devra donc expliciter l'échelle de chaque hypothèse.

Écriture du rendement global

Pour la planification analytique, le nombre de particules identifiables peut être écrit sous la forme

$$N_{\text{id}} = \int n A_{\text{eff}} v_{\text{rel}} \eta_r \eta_a dt.$$

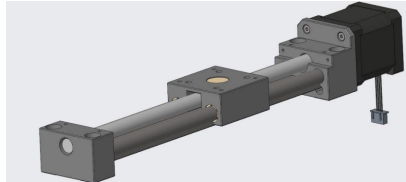
Cette relation n'est pas une loi de la nature supplémentaire ; c'est une décomposition pratique. Elle évite d'attribuer à l'aérodynamique une perte qui se produit en laboratoire, ou au matériau une perte qui vient en réalité de la déviation du flux.

L'incertitude sera propagée par échantillonnage de plusieurs distributions de paramètres plutôt que par une simple somme d'erreurs relatives lorsque les dépendances sont non linéaires. Une approche Monte-Carlo permettra par exemple de faire varier concentration, taille, orientation, densité du gaz et efficacité analytique. Le résultat sera présenté sous forme d'intervalle probabiliste et de sensibilité aux paramètres dominants.

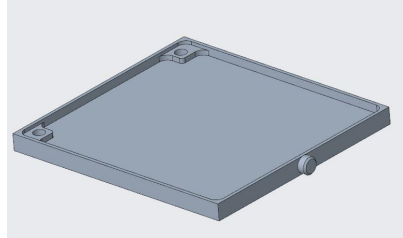
9 Matrice de vérification et campagne d'essais

Objet	Essai	Mesure / critère	Moment
Aérogel	caractérisation lot	masse, volume, défauts, fond analytique	avant intégration
Aérogel	vibration sur éprouvette	absence de perte ou fissuration incompatible	développement
Aérogel	impact analogues	profondeur, fragmentation, retrouvabilité	développement
Grilles/supports	fond analytique	composition initiale et propreté	avant intégration
Tiroir	endurance	temps, courant, répétabilité sur cycles répétés	prototype
Tiroir	basse température	mouvement complet et marge de courant	prototype
Tiroir	basse pression	mouvement et dissipation	prototype intégré
Fermeture	étanchéité particulière	comparaison témoins avant/après cycles	développement
Structure	analyse modale/FEA	contraintes et fréquences propres	à chaque gel CAO
Module	vibration	intégrité + cycle fonctionnel après essai	qualification
Module	inspection masse	masse, CG, inerties	avant livraison
Électronique	alimentation	transitoires moteur sans reset	prototype
Électronique	capteurs	cohérence, plage, bruit, dérive	prototype
Logiciel	machine d'états	transitions nominales	tests unitaires/HIL
Logiciel	défauts	délai, capteur incohérent, perte commande	HIL
Stockage	endurance	fichiers complets, reprise après coupure	prototype
Système	thermique	températures sous scénarios représentatifs	intégré
Système	FST local	séquence complète et journal interprétable	avant revue
Système	EIT/EMC	compatibilité interface REXUS	intégration
Science	blanc de procédure	contaminants de manipulation	avant vol
Science	analyse témoin	fond comparé aux supports exposés	après vol

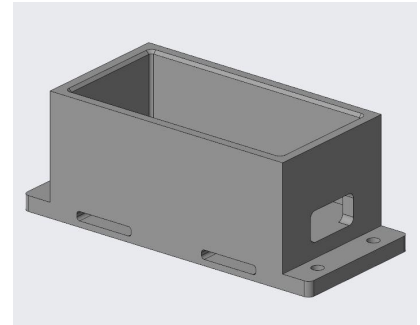
La campagne est organisée de manière à conserver une configuration identifiable. Un résultat d'essai n'est transférable à la version suivante que si la modification n'affecte pas la fonction testée. Changer le moteur, le joint ou la fixation d'un capteur peut imposer de répéter un essai qui semblait déjà terminé. Cette discipline évite de construire une qualification à partir de preuves appartenant en réalité à plusieurs versions incompatibles.



(a) Actionnement.



(b) Plateau.



(c) Carter.

Figure 9.1 – Sous-ensembles mécaniques qui seront qualifiés séparément puis dans la configuration intégrée.

La figure 9.1 rappelle les trois sous-ensembles sur lesquels s'appuie la matrice d'essais : l'actionnement produit le mouvement, le plateau porte la fonction scientifique et le carter assure guidage et protection. Les qualifier séparément permet d'isoler une défaillance ; la qualification intégrée vérifie ensuite que leurs interfaces conservent les performances obtenues composant par composant.

10 Séquence de mission et données à conserver

Chronologie nominale

Phase	État collecteur	Action principale	Données critiques
Pré-vol	fermé	vérifier configuration et supports	identifiants, version, positions
Compte à rebours	fermé	surveillance et armement	tension, température, état logique
Propulsion	fermé	aucune exposition	IMU, tension, événements mission
Montée haute	fermé puis ouverture	déclencher au seuil de mission	commande, temps, encodeur, fins de course
Collecte	ouvert	enregistrer environnement	pression, température, IMU, état position
Descente haute	ouvert puis fermeture	rétracter et confirmer	commande, temps, courant, position
Rentrée	fermé	surveiller intégrité	IMU, température, état fermé
Descente parachute	fermé	conserver journal	état, température
Impact	fermé	enregistrer choc si possible	IMU, horodatage
Récupération	fermé	copie données sans ouvrir science	fichier brut, photos
Laboratoire	contrôlé	transfert supports	chaîne de possession

Structure minimale du journal

Le journal événementiel doit permettre une lecture indépendante du code source. Chaque entrée contiendra au minimum un temps, un identifiant d'événement, l'état courant et les valeurs de position nécessaires à son interprétation. Les mesures continues seront stockées dans des blocs séparés ou avec un type d'enregistrement distinct afin d'éviter de confondre une commande avec une mesure.

Table 10.2 – Exemple de dictionnaire de données.

Champ	Type	Utilité
timestamp	entier/temps	alignement de toutes les mesures
state	code	phase logique du système
event	code	commande ou transition importante
encoder	entier	déplacement relatif du mécanisme
limit_closed	booléen	confirmation physique fermé
limit_open	booléen	confirmation physique ouvert
hall_state	code	position complémentaire
pressure	réel	contexte atmosphérique
temperature	réel	contexte thermique
accel_xyz	3 réels	dynamique et chocs
gyro_xyz	3 réels	rotation du véhicule
motor_current	réel	effort et diagnostic mécanisme
supply_logic	réel	santé alimentation logique
supply_motor	réel	santé alimentation actionneur
fault_flags	bits	anomalies et sécurité

11 Chaîne d'analyse post-vol

L'ordre des analyses est conçu pour maximiser l'information conservée. La première passe documente l'échantillon sans le modifier. Les étapes suivantes augmentent progressivement la résolution ou la spécificité chimique. Une analyse destructive n'est engagée que lorsqu'elle répond à une question que les méthodes précédentes n'ont pas résolue.

Étape	Question	Information produite	Impact échantillon
Inspection optique	où sont les traces ?	carte des impacts, défauts, zones prioritaires	nul
Mesure des pistes	comment l'objet a-t-il pénétré ?	direction, longueur, géométrie	nul
MEB	quelle morphologie ?	taille, texture, agrégation, fragments	faible
EDS	quels éléments ?	carte Fe, Mg, Si, O, Ni, Al, etc.	faible à modéré
Raman	quelles phases/liaisons ?	information structurale/minéralogique	faible à modéré
FTIR	quelles fonctions chimiques ?	signatures moléculaires et fond organique	faible
Extraction	faut-il isoler la piste ?	volume manipulable pour analyse avancée	irréversible
Analyse isotopique	origine compatible ?	rapports isotopiques selon masse disponible	potentiellement destructive
Comparaison témoins	le signal est-il propre au vol ?	fond de fabrication/manipulation	nul sur science

La conclusion finale conservera la trace du niveau de preuve. Une particule pourra être classée comme contaminant identifié, candidat faible, candidat compatible ou objet présentant plusieurs indices convergents. Cette gradation

est préférable à une séparation binaire « MSP / non MSP » lorsque la masse est faible et que certaines signatures restent ambiguës.

12 Risques principaux et réduction de l'incertitude

Risque	Effet	Prévention	Détection / récupération
Faible densité de particules	peu d'objets analysables	fenêtre maximisée, aire utile, modèle probabiliste	interprétation d'une non-détection
Déviations par l'écoulement	aire effective réduite	CFD + trajectoires + géométrie	cartographie dépôts
Contamination pré-vol	faux positifs	propreté, témoins, confinement	analyse blancs
Contamination post-vol	signal brouillé	module fermé, ouverture contrôlée	témoin et chaîne de possession
Fragmentation à l'impact	perte de signature	choix matériau, essais analogues	microscopie des pistes
Fissuration aérogel	perte/support parasite	maintien, vibration, formulation robuste	inspection pré/post
Tiroir bloqué fermé	pas de collecte	jeux, couple, essais froid/vibration	journal de position
Tiroir bloqué ouvert	contamination/risque	fermeture prioritaire, guidage, marge moteur	capteurs et récupération
Reset calculateur	séquence perdue	séparation puissance, watchdog	journal redémarrage
Erreur de temps de déclenchement	mauvaise fenêtre	profil mission + événements REXUS	données pression/IMU
Capteur de position faux	état ambigu	observables diversifiés	cohérence encodeur/temps
Masse trop élevée	incompatibilité intégration	budget conservatif et marge	pesée progressive
Bruit électromagnétique	données corrompues/reset	routage, filtres, protections	EIT/EMC
Analyse insuffisamment sensible	candidats non identifiés	sélection méthodes + essais pré-vol	adaptation chaîne analytique

Les risques ne sont pas indépendants. Par exemple, augmenter la surface ouverte peut améliorer la probabilité de capture mais augmenter le couple aérodynamique, la masse et la contamination. Augmenter la densité de l'aérogel peut améliorer la tenue mécanique mais modifier l'impact et le fond analytique. Les arbitrages sont donc effectués au niveau de la chaîne de mesure complète.

13 Glossaire

Terme	Définition utilisée dans ce document
COSMIC	Collecte suborbitale de microparticules d'origine météorique ; nom de l'expérience.
REXUS	Rocket EXperiments for University Students, programme de fusées-sondes étudiantes.
SED	Student Experiment Documentation.
MSP	Meteoritic Smoke Particle ; particule nanométrique issue de la transformation de matière météoritique ablatée.

Terme	Définition utilisée dans ce document
Mésosphère	région atmosphérique située approximativement entre 50 km et 85 km.
NLC	Noctilucent Cloud ; nuage mésosphérique de cristaux de glace.
PMSE	Polar Mesosphere Summer Echo ; échos radar polaires d'été associés à la structure plasma-poussières.
Aérogel	solide nanoporeux de très faible densité utilisé comme milieu de capture progressive.
MEB/SEM	microscope électronique à balayage / scanning electron microscope.
EDS/EDX	spectroscopie X à dispersion d'énergie pour l'analyse élémentaire.
Raman	spectroscopie vibrationnelle fondée sur la diffusion inélastique de la lumière.
FTIR	spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier.
IMU	centrale inertielle combinant accéléromètres et gyroscopes.
CFD	computational fluid dynamics ; simulation numérique des écoulements.
DSMC	Direct Simulation Monte Carlo ; méthode cinétique pour gaz raréfiés.
Kn	nombre de Knudsen, rapport entre libre parcours moyen et longueur caractéristique.
St	nombre de Stokes, comparaison du temps de réponse particulaire au temps de l'écoulement.
FRP	Flight Requirements Plan, document de mission qui fixe les informations propres au vol.
FST	Flight Simulation Test, répétition intégrée de la séquence de mission.
EIT	Electrical Interface Test, vérification des interfaces électriques avec le système REXUS.
Témoin / blanc	support suivant une chaîne contrôlée sans recevoir l'exposition scientifique correspondante.
Chaîne de possession	enregistrement des transferts et manipulations permettant de conserver l'identité d'un échantillon.

Bibliographie

- [1] EuroLaunch, *REXUS User Manual*, version 7.17, DLR MORABA et SSC, 26 novembre 2021.
- [2] REXUS/BEXUS Programme, *REXUS – Rocket Experiments for University Students*, documentation officielle du programme, consultée en 2026.
- [3] REXUS/BEXUS Programme, *Student Experiment Documentation Guidelines*, version 6.4, 14 octobre 2024.
- [4] J. M. C. Plane, « Cosmic dust in the Earth's atmosphere », *Chemical Society Reviews*, vol. 41, 2012, p. 6507–6518, doi :10.1039/C2CS35132C.
- [5] J. M. C. Plane, W. Feng et E. C. M. Dawkins, « The Mesosphere and Metals : Chemistry and Changes », *Chemical Reviews*, vol. 115, no 10, 2015, p. 4497–4541, doi :10.1021/cr500501m.
- [6] O. Kalashnikova et al., « Meteoric smoke production in the atmosphere », *Geophysical Research Letters*, vol. 27, no 20, 2000, p. 3293–3296, doi :10.1029/1999GL011338.
- [7] T. Vondrak, J. M. C. Plane, S. Broadley et D. Janches, « A chemical model of meteoric ablation », *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 8, 2008, p. 7015–7031, doi :10.5194/acp-8-7015-2008.
- [8] L. Megner, M. Rapp et J. Gumbel, « Distribution of meteoric smoke – sensitivity to microphysical properties and atmospheric conditions », *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 6, 2006, p. 4415–4426, doi :10.5194/acp-6-4415-2006.
- [9] C. G. Bardeen, O. B. Toon, E. J. Jensen, D. R. Marsh et V. L. Harvey, « Numerical simulations of the three-dimensional distribution of meteoric dust in the mesosphere and upper stratosphere », *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, vol. 113, D17202, 2008, doi :10.1029/2007JD009515.
- [10] J. Gumbel et L. Megner, « Charged meteoric smoke as ice nuclei in the mesosphere : Part 1 – A review of basic concepts », *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 71, 2009, p. 1225–1235.
- [11] M. E. Hervig et al., « First satellite observations of meteoric smoke in the middle atmosphere », *Geophysical Research Letters*, vol. 36, L18805, 2009, doi :10.1029/2009GL039737.
- [12] M. Rapp et F.-J. Lübken, « Polar mesosphere summer echoes (PMSE) : Review of observations and current understanding », *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 4, 2004, p. 2601–2633, doi :10.5194/acp-4-2601-2004.
- [13] W. Reid, P. Achtert, N. Ivchenko, P. Magnusson, T. Kuremyr, V. Shepenkov et G. Tibert, « A novel rocket-based in situ collection technique for mesospheric and stratospheric aerosol particles », *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 6, 2013, p. 777–785, doi :10.5194/amt-6-777-2013.
- [14] J. Hedin et al., « The MAGIC meteoric smoke particle sampler », *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2014, doi :10.1016/j.jastp.2014.03.003.

- [15] A. Pineau, H. Trollvik, H. Greaser, S. Olsen, Y. Eilertsen et I. Mann, « Simulations of the collection of mesospheric dust particles with a rocket instrument », *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 17, 2024, p. 3843–3861, doi :10.5194/amt-17-3843-2024.
- [16] M. J. Burchell, G. Graham et A. Kearsley, « Cosmic Dust Collection in Aerogel », *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 34, 2006, p. 385–418, doi :10.1146/annurev.earth.34.031405.124939.
- [17] A. J. Westphal et al., « Aerogel keystones : extraction of complete hypervelocity impact events from aerogel collectors », *Meteoritics & Planetary Science*, vol. 39, no 8, 2004, p. 1375–1386, doi :10.1111/j.1945-5100.2004.tb00952.x.
- [18] D. Brownlee et al., « Comet 81P/Wild 2 under a microscope », *Science*, vol. 314, no 5806, 2006, p. 1711–1716, doi :10.1126/science.1135840.
- [19] D. R. Frank et al., « Stardust Interstellar Preliminary Examination II : Curating the interstellar dust collector, picokeystones, and sources of impact tracks », *Meteoritics & Planetary Science*, vol. 49, 2014, p. 1522–1547, doi :10.1111/maps.12147.
- [20] M. Tabata, H. Yano, H. Kawai, E. Imai, Y. Kawaguchi, H. Hashimoto et A. Yamagishi, « Silica aerogel for capturing intact interplanetary dust particles for the Tanpopo experiment », *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, vol. 45, no 1–2, 2015, p. 225–229, doi :10.1007/s11084-015-9423-8.
- [21] L. Xiao et al., « Characterizing and modeling penetration tracks in silica aerogel for cosmic dust capture via laser-induced microparticle impact test », *International Journal of Impact Engineering*, vol. 211, 2026, 105621, doi :10.1016/j.ijimpeng.2025.105621.
- [22] T. Aylett et al., « Optical properties of meteoric smoke analogues », *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 19, 2019, p. 12767–12777, doi :10.5194/acp-19-12767-2019.
- [23] R. W. Saunders, S. Dhomse, W. S. Tian, M. P. Chipperfield et J. M. C. Plane, « Interactions of meteoric smoke particles with sulphuric acid in the Earth's stratosphere », *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 12, 2012, p. 4387–4398, doi :10.5194/acp-12-4387-2012.
- [24] A. D. James, J. S. A. Brooke, T. P. Mangan, T. F. Whale, J. M. C. Plane et B. J. Murray, « Nucleation of nitric acid hydrates in polar stratospheric clouds by meteoric material », *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 18, 2018, p. 4519–4531, doi :10.5194/acp-18-4519-2018.
- [25] A. D. James, F. Pace, S. N. F. Sikora, G. W. Mann, J. M. C. Plane et B. J. Murray, « The importance of acid-processed meteoric smoke relative to meteoric fragments for crystal nucleation in polar stratospheric clouds », *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 23, 2023, p. 2215–2233, doi :10.5194/acp-23-2215-2023.
- [26] S. A. Sandford et al., « Assessment and control of organic and other contaminants associated with the Stardust sample return from comet 81P/Wild 2 », *Meteoritics & Planetary Science*, vol. 45, 2010, p. 406–433, doi :10.1111/j.1945-5100.2010.01031.x.
- [27] M. E. Zolensky et al., *FTIR Analysis of Aerogel Keystones from the Stardust Interstellar Dust Collector : Assessment of Terrestrial Organic Contamination and X-Ray Microprobe Beam Damage*, NASA Technical Reports Server, document 20110005582, 2011.
- [28] J. M. Picone, A. E. Hedin, D. P. Drob et A. C. Aikin, « NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere : statistical comparisons and scientific issues », *Journal of Geophysical Research : Space Physics*, vol. 107, 2002, art. 1468, doi :10.1029/2002JA009430.
- [29] G. A. Bird, *Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows*, Oxford Engineering Science Series 42, Clarendon Press, 1994.
- [30] European Cooperation for Space Standardization, *ECSS-E-ST-10-03C Rev.1 – Testing*, 2022.
- [31] European Cooperation for Space Standardization, *ECSS-Q-ST-70-01C Rev.1 – Cleanliness and contamination control*, 2025.
- [32] International Organization for Standardization, *ISO 14644-1 :2015 – Cleanrooms and associated controlled environments : classification of air cleanliness by particle concentration*, 2015.
- [33] NASA, *NASA Systems Engineering Handbook*, NASA/SP-2016-6105 Rev. 2, 2017.
- [34] STMicroelectronics, *STM32H743/753 datasheet and reference manual*, documentation constructeur.
- [35] Texas Instruments, *TMP117 High-Accuracy, Low-Power Digital Temperature Sensor*, fiche technique.
- [36] STMicroelectronics, *ISM330DHCX iNEMO inertial module*, fiche technique.
- [37] Honeywell, *ABP Series Basic Board Mount Pressure Sensors*, fiche technique.