

USAIRE STUDENT AWARDS  
10 PAGER • 2024

# SATCHARG

BUSINESS PLAN ET PROPOSITION TECHNIQUE

---

**SatCharge** est une entreprise fictive créée dans le cadre du travail de recherche.  
Le rapport est rédigé dans cet esprit.



**03**

**Recharger  
et sécuriser**

**04**

**Modèles de  
vente et clients**

**05**

**Faisabilité  
technologique**

**07**

**Marché de  
l'électrique spatial**

**08**

**Overview du  
Business Plan**

**09**

**Performance  
financière**

**10**

**Législations et  
Lobbying**

**11**

**Lettre aux  
investisseurs**

# 1. RECHARGER ET SÉCURISER

L'espace comme l'aéronautique font face à un défi de taille : **concilier croissance de la demande et soutenabilité de la croissance de l'offre** [1]. Dans les airs, cela se traduit par la recherche de solutions de propulsion décarbonées et par la décarbonation de l'industrie [2]. Dans l'espace, la gestion des débris devient une urgence [3], avec à ce jour pour premières réponses la commercialisation de lanceurs réutilisables [4] ou générant au moins moins de débris [5].

**Les solutions de « nettoyage » de l'espace font face à des contraintes importantes**, en premier lieu leur modèle économique, en second lieu la complexité technique de telles opérations. Elles seraient pourtant bénéfiques à l'industrie [6].

Par ailleurs, la décarbonation des opérations de mise en orbite comme la recherche de profits dans la commercialisation du spatial incitent à **produire des satellites plus légers** [7], disposant de moyens de propulsion plus efficaces nécessitant moins d'ergols [8].

Cependant, l'alternative existante et employée aux propulsions traditionnelles chimiques, la **propulsion électrique** -substantiellement plus légère [9]-, **est contrainte par la capacité des satellites à produire et conserver de l'énergie** aussi bien pour leur mission que leur propulsion. Cela contraint leur manoeuvrabilité, aussi bien que leur durée de vie, l'électro-propulsion perdant en efficacité et consommant davantage de gaz à faible puissance [10].

La solution que nous proposons vise à **concevoir dans un premier temps une solution de recharge rapide des satellites positionnés en Orbite Basse Terrestre (LEO) et de prévention des risques posés par les débris en orbite**. Dans un second temps, elle prendra la forme d'un réseau de production et de distribution électrique positionné en LEO.

Ses applications sont triples : immédiates, conditionnées à une adaptation client ou futures.

Dès la mise en orbite de la première centrale de production électrique en orbite, il nous sera possible de **suivre et de mettre hors d'état de nuire plus d'un millier de déchets annuellement** [11]. Aussi, nous serons en mesure de proposer une recharge améliorée voire rapide des satellites temporairement ou plus longuement dans le rayon d'émission de notre centrale, afin de rendre leur propulsion plus performante pour une manoeuvre d'urgence, scientifique ou de désorbitation.

**D'autres applications suivront.** **1.** Les premières conditionnées à une modification de l'architecture des satellites des clients potentiels, les rendant compatibles à une distribution d'électricité à distance en continu. **2.** Les secondes dépendant de développements ultérieurs impliquant le secteur aérospatial plus largement. Celles-ci ouvriraient la voie à **3.** une optimisation du poids mis en orbite afin de prolonger la durée de vie d'un satellite, la qualité et le nombre de ses composants ou sa capacité à être opérationnel sans interruption. **4.** Elles permettraient également l'emport de solutions de propulsion plus puissantes, dans le contexte des programmes de retour de l'homme sur la lune et de construction de bases éventuelles ou d'envoi de l'homme vers Mars. **5.** Enfin, elles seraient aussi liées à l'aéronautique, la transmission d'énergie à distance étant une solution putative au défi de décarbonation des avions de ligne [12].

## 2. MODÈLES DE VENTE ET CLIENTS

Notre modèle de vente repose sur trois sources différentes qui permettent de cibler une variété de clients

### MODÈLES DE VENTE

Le service d'**alimentation ponctuelle** offre une alimentation électrique intermittente mais prévisible pour la gestion des manœuvres et tout autre emploi des moteurs électriques. Deux types de pricing permettent de répondre aux besoins du marché:

- **Pay-as-you-go** : Paiement uniquement pour l'énergie consommée, avantageux pour les petits opérateurs et les ajustements occasionnels
- **Subscription** : Format qui garantit un approvisionnement stable en électricité tout en facilitant la planification budgétaire pour les grands opérateurs ou gouvernements

Le service d'**alimentation continue** offre une alimentation électrique ininterrompue, négociée directement avec les opérateurs au fur et à mesure du déploiement de notre réseau. Cela permet une approche personnalisée en fonction des besoins énergétiques spécifiques de chaque constellation de satellites à la fois à des fins de propulsion que des fins d'alimentation pour les systèmes embarqués.

Le service de **gestion des débris spatiaux** offre grâce à la technologie d'ablation et de forçage radiatif une possibilité de détruire ou déplacer les débris spatiaux. Trois types de contrats sont envisageables pour ce type de revenus:

- **Institutional Clean-Up** : Modèle destiné aux gouvernements et organisations internationales qui profitent d'un tarif préférentiel au kWh d'énergie utilisée
- **Private Clean-Up** : Modèle destiné aux grands opérateurs de satellites et constellations contraints par la législation anti-débris de souscrire à des services de gestion des débris.

- **Emergency Ablation Procedures** : Ce service sera vendu plus cher et s'agit d'interventions d'urgence pour l'ablation de débris menaçant des satellites opérationnels.

### TYOLOGIE DES CLIENTS

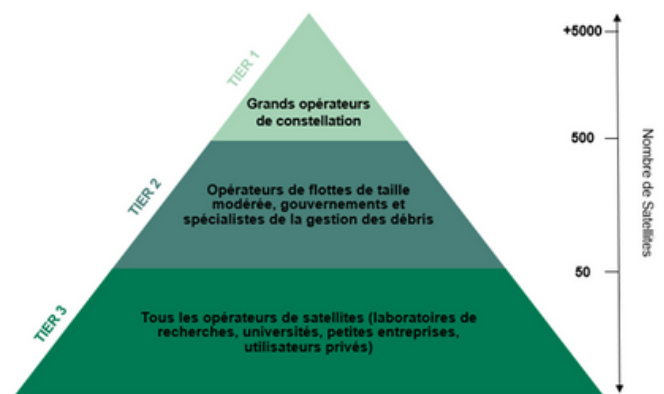


FIGURE 2.1. SCHÉMA DES TIERS DES CLIENTS

**Tier 1** : Ces clients seront la première cible de nos démonstrateurs et serviront de partenaires stratégiques lors des essais dans l'espace. Les premières entreprises privées contactées seront SpaceX avec Starlink, Eutelsat avec OneWeb, et Amazon avec Kuiper.

**Tier 2** : Le deuxième tier englobe les clients opérant des flottes plus limitées entre 50 et 500 satellites ce qui correspond idéalement aux besoins des agences gouvernementales à la fois civiles et militaires (NASA, ESA, JAXA).

**Tier 3** : Le Tier 3 générera la plus faible part de revenus mais regroupe néanmoins tous autres opérateurs de satellites qui sont voués à se multiplier avec la démocratisation de l'espace et l'abaissement des coûts de lancement.

## 3. FAISABILITÉ TECHNOLOGIQUE

Notre projet repose sur 3 piliers. Premièrement, mettre en orbite **10 centrales nucléaires**. Deuxièmement, **transmettre leur énergie** directement à un satellite demandeur ou par l'intermédiaire de relais. Troisièmement, déplacer par **ablation laser** des débris dans le champ d'action des centrales primaires. (Voir annexe n°1).

### CONTRAINTE DE MASSE

Actuellement, satellites, sondes et stations en orbite sont conçus pour produire l'énergie qu'ils consomment, dans la limite des contraintes de masse de chacun de ces satellites. **Dans le cadre d'une production d'électricité indépendante de la mission scientifique, militaire ou commerciale d'un satellite, le satellite producteur voit sa masse entièrement consacrée à la production d'énergie.** La première limite qui s'impose à notre solution en gardant à l'esprit un développement limité dans le temps est la capacité d'emport maximale des lanceurs actuellement en fin de développement.

Le lanceur qui semble à ce jour le plus abouti est le Starship de SpaceX, qui est déjà parvenu à mettre en orbite son second étage chargé de transporter 100 à 250 Tonnes en LEO. Cette capacité est censée évoluer à la hausse. Ici, nous considérerons un emport maximal de 200T en LEO, le plafond actuel de réutilisation du Starship [1].

### PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

**Sur Terre**, la production d'électricité est caractérisée par sa disponibilité, sa pilotabilité, son efficacité, son impact environnemental et son coût. Si les technologies les plus efficaces en terme de conversion d'énergie primaire en énergie électrique sont les centrales hydroélectriques, l'éolien ou les centrales à gaz, celles-ci ne sont pas concevables en orbite.

Les alternatives à ces technologies efficaces sont les centrales nucléaires (efficacité comprise entre 33 et 37%) [2] et les centrales solaires photovoltaïques (20%) [3].

Un équipement respectant la contrainte de masse fixée précédemment serait un **SNPP** (Système Nucléaire de Production de Puissance). Nous excluons le solaire comme source de production principale étant donnée l'efficacité par unité de surface des panneaux solaires actuels. Plusieurs dizaines d'ha. seraient nécessaires à la production de 14MW (3.4ha à 30% d'efficacité) (annexe n°2).

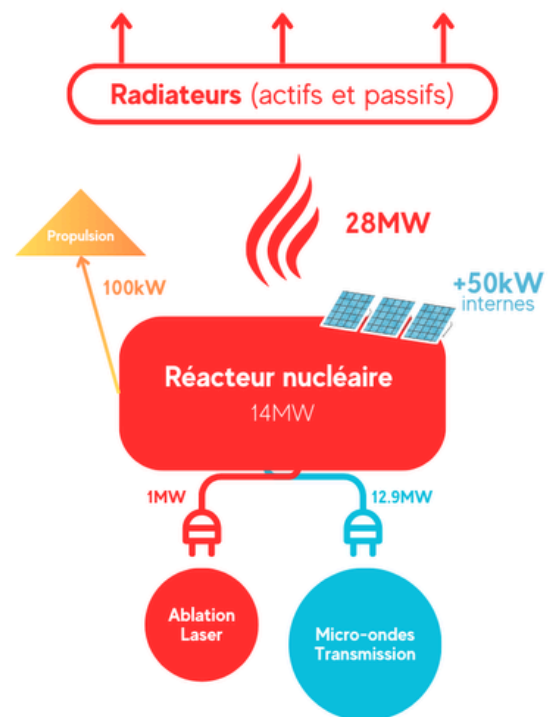


FIGURE 3.1. SCHÉMA DU SNPP SATCHARGE EN ORBITE

L'eau ne pouvant être utilisée comme fluide de refroidissement considérant le comportement des fluides en micro-gravité, nous pouvons faire le choix d'un réacteur se refroidissant par l'intermédiaire de métal liquide ou de gaz. **La solution au gaz est privilégiée pour les réacteurs délivrant une forte puissance** à haute température de fonctionnement, ce qui correspond à notre cas [4].

## DISSIPATION D'ÉNERGIE

Centrale nucléaire et panneaux photovoltaïques (PV) présentent la même contrainte, leur efficacité. Considérant les PV actuellement en développement, nous pouvons acter que ces deux modes ont le même rendement : 35% en moyenne [3]. **Pour 14MW de puissance utile, 28MW sont à dissiper.** La solution actuellement majoritairement déployée, le radiateur, présente une contrainte de taille et de poids qui a contribué à la limite supérieure en puissance du réacteur. La surface de radiation est déterminée par la relation de Stefan-Boltzmann (annexe n°3). Celle-ci dépend de la puissance à dissiper, ainsi que de la température de surface du radiateur. On trouve ici 0.4ha de surface de radiateur, 0.2ha effectifs en considérant un **radiateur double face**, 550K en surface. La masse des radiateurs pouvant être estimée à 6.6kg/m<sup>2</sup> (ISS)[5], nous prévoyons 26T de radiateurs. L'ajout de systèmes de **refroidissement actif** pourrait contribuer à une réduction de la masse et de la surface nécessaires.

## CONTRIBUTIONS À LA MASSE

La détermination de la masse du réacteur nucléaire nous est permise par une étude (NASA) qui a évalué la masse de SNPP refroidis au gaz pour une production >10MW avec cycle de **Brayton-Stirling** [6]. Celle-ci est de 2kg/kW, d'où une masse du réacteur de 28T. La propulsion électrique de 100kW du réacteur et le Xenon embarqué occupent 5.1T, auxquels s'ajoute la structure externe au réacteur (10T).

## TRANSMISSION D'ÉNERGIE

La transmission énergétique pose deux défis principaux : transmettre précisément et avec le moins de pertes possibles. La précision nous est permise par le choix d'optiques adaptatives [7], précises et dimensionnées afin, pour un laser, de ne pas dépasser 5m de divergence après 300km de voyage (nous considérons le laser gaussien et un diamètre de départ proche d'1m) [8]. Néanmoins, les pertes induites par une transmission laser en raison de la conversion énergétique en amont comme en aval de la transmission avoisinent 90% [8].

En considérant qu'un développement ultérieur pourrait minimiser les pertes, nous ne pouvons pas uniquement compter sur la technologie laser.

Nous projetons alors de déployer une constellation proche de la majorité des satellites en LEO, inclinée à 55°, sur une orbite de 650km d'altitude, inférieure à celle de la majorité des débris [9]. Elle sera composée de 3000 relais répartis à 500km d'intervalle (constellation de Walker). Les relais reposeront sur un ensemble producteur (PV)- récepteur (antenne souple, annexe n°4)- transmetteurs (radio-ondes / laser bleu [10]) afin de transmettre l'énergie à nouveau ou de la transmettre à un satellite en laser (caractéristiques en annexe). Les pertes des transmissions par ondes (ici 30GHz), sont actuellement de 1 à 8% par composant de la chaîne de transmission, nous espérons les minimiser afin d'atteindre une efficacité supérieure à 95%, quitte à combiner la puissance de plusieurs centrales pour une transmission majeure. **L'ablation sera elle assurée depuis la centrale, à l'aide d'un laser (rouge) de 100kW [11].**

FIGURE 3.2. SCHÉMA DE LA CONSTELLATION



## 4. MARCHÉ DE L'ÉLECTRIQUE SPATIAL

### GRANDES TENDANCES

L'exploration spatiale et les missions en orbite basse terrestre (LEO) connaissent une croissance rapide, soutenue par les avancées technologiques et l'expansion des activités commerciales. Selon Euroconsult, le nombre de satellites en orbite basse pourrait atteindre environ 25 000 d'ici 2032 avec plus de 50% de ces satellites présents au sein de cinq grandes méga-constellations [1]. La croissance du secteur est notamment motivée par les progrès dans le domaine des lancements (réutilisabilité, charge utile) et la popularisation des nanosatellites.

### CONSOMMATION À BORD DES SATELLITES

La majorité de la consommation électrique à bord des satellites émane des systèmes embarqués tels que les expériences, systèmes de communication, radars, ou lasers. Actuellement, la consommation moyenne est de l'ordre de 2000W pour les satellites en LEO [2] et est fournie par des panneaux solaires mesurant entre 10m<sup>2</sup> et 50m<sup>2</sup>. Par ailleurs, la transition vers une motorisation électrique des satellites est déjà en marche, appuyée par l'ISP 5 à 10 fois plus grand des moteurs à effet Hall par rapport aux moteurs chimiques classiques[3].

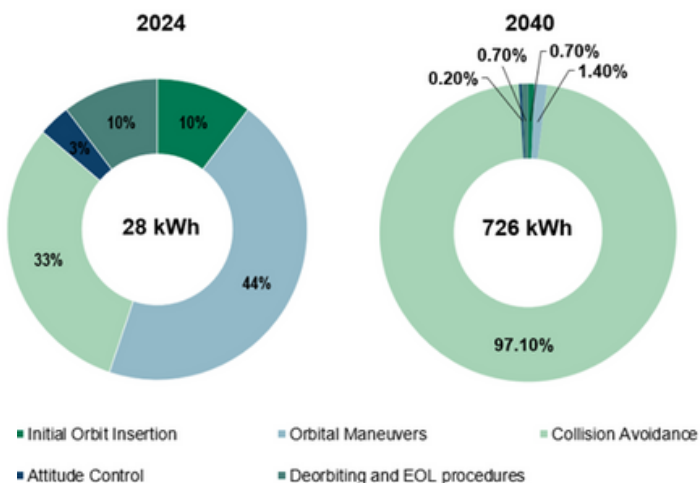


FIGURE 4.1. CONSOMMATION À BORD DES SATELLITES POUR DES FINS DE PROPULSION 2024 VS 2040

On remarque la part largement majoritaire qu'occupera les manœuvres anticollisions d'ici 2040 dû à la multiplication des débris.

Concernant les besoins pour les systèmes embarqués et le fonctionnement habituel du satellite nous avons estimés une demande de 750 TWh pour la totalité de la flotte de satellites en LEO d'ici 2040, une quantité équivalente à la consommation annuelle d'électricité du Brésil [4].

### CONSOMMATION POUR LA GESTION DES DÉBRIS SPATIAUX

La densité des débris spatiaux croît de manière exponentielle depuis les dernières années tel qu'il a été théorisé par Donald Kessler en 1978. En effet, les collisions entre débris génèrent des nouveaux débris augmentant ainsi le nombre et la probabilité de collisions futures. En 2010, l'ESA recensait 14000 objets dont une majorité était identifié, dans leur étude sur l'Environnement Spatial en 2024, l'agence recense plus de 34000 objets dont 7500 non-identifiés [5]

Types de Débris	2024	2040
>10cm	40,500	1.7B
1-10cm	1.1M	1,575B
>1mm	130M	18,623B

FIGURE 4.2. TABLEAUX DES ESTIMATIONS DU NOMBRE DE DÉBRIS EN FONCTION DE LEUR TAILLE 2024 -2040

La demande en électricité pour des fins d'ablation et d'application de forçage radiatif a été estimé en modélisant la croissance des débris par des fonctions exponentielles dérivées des tendances entre 1960 et 2024 pour les débris de plus de 10cm, de 1cm à 10cm, et de 1cm à 1mm.

## 5. OVERVIEW DU BUSINESS PLAN

À la suite de l'analyse du marché ainsi que le bilan des solutions technologiques existantes et potentielles, nous avons décidés de lancer une start-up spécialisée dans les solutions de distribution d'électricité dans l'espace. Le projet est ambitieux et demande une roadmap commerciale et financière complexe mais faisable.

### AVANTAGE COMPÉTITIF ET TIMING

Le marché de l'électricité dans l'espace à des fins opérationnels ou de gestion des débris est voué à atteindre plus de 50 000 TWh. SatCharge cherche à exploiter l'avantage compétitif du primo-rentrant sur le secteur avec la première centrale nucléaire dans l'espace et le premier réseau de distribution par micro-ondes et lasers. En effet, les briques technologiques existent et ont souvent été limitées par le passé par des contraintes de masse au lancement, une réalité bousculée par le développement des méga-lanceurs comme Starship avec une capacité d'emport de plus de 200 tonnes [1]. En somme, notre startup se positionne sur le marché avec un timing idéal lui permettant de profiter des avancées technologiques du secteur tout en restant pionnière dans le domaine.

### STRATÉGIE GO-TO-MARKET

Les premiers clients seront les opérateurs de constellations qui seront initiés au pay-as-you-go avant d'être fidéliser sur le modèle de souscription leur permettant de répondre à tous les besoins de propulsion de leur flotte. La motorisation 100% électrique à haute puissance leur donnera plus de flexibilité et augmentera le champ d'opération de leur constellation. Lorsque le réseau en alimentation continu est opérationnel à travers nos satellites relais, ces premiers clients seront prêts à faire le pas vers du 100% électrique en réseau pour faire des gains de masse sur les panneaux solaire et batteries.

### ÉTAPES MAJEURES ET TIMELINE

**2024**



Création de SatCharge avec implantation d'un centre de recherche et de design à Toulouse. Début de la R&D sur les composants des relais et l'adaptation à l'environnement spatial du microréacteur nucléaire

**2025**



Premier round d'investissements clôturés en fin d'année auprès de angel investors qui permettent de faire un prêt de \$5M et d'élargir l'équipe pour atteindre 25 employés dont une majorité d'ingénieurs et de techniciens

**2027**



Début de la phase de préparation de lancement avec la location de terrains au Starbase, Texas et à Kourou, Guyane pour assembler et surveiller les lancements sur place. Les efforts de levé de fonds continuent avec une Série B à \$150M

**2029**



Lancement d'une première centrale miniaturisée à 1MW permettant des essais de production d'énergie et de transmission à haut débit ainsi que la technique d'ablation par laser

**2030**



Première année de chiffres d'affaires positif à \$56M suite au lancement en début d'année de la première centrale à taille opérationnelle de 14MW

**2031**



IPO de SatCharge à la bourse de New York pour devenir la première licorne française du spatiale et équilibre financier de l'entreprise avec un résultat net de \$15.5M

**2034**



Commercialisation de la solution d'alimentation en continu et cap du milliard de débris détruits

**2040**



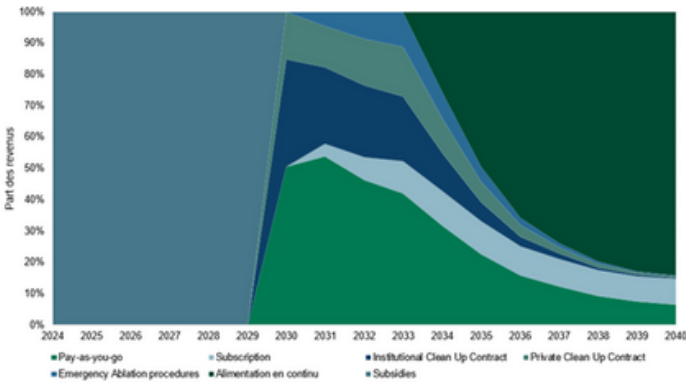
Déploiement de 100% des antennes relais (3000) pour une couverture totale du globe terrestre et début de la recherche sur les applications extra-orbitales à des fins d'exploration spatiale



## 6. PERFORMANCE FINANCIÈRE

### REVENUS

Sur la base du marché accessible et le déploiement de notre réseau de distribution nous avons constaté une évolution de la part des revenus attribués à chacune des sources (alimentation ponctuelle, continu, et gestion des déchets). En effet, dans un premier temps jusqu'en 2030, nos revenus sont fondés sur des subventions pour ensuite rapidement se redistribuer sur nos structures de souscription, pay-as-you-go et gestion des déchets. A l'horizon 2040, nous estimons une réduction de la part de marché de l'alimentation ponctuelle et la gestion des déchets jusqu'à 20%.



**FIGURE 6.1. PART DES REVENUS ATTRIBUÉS AUX MODÈLES DE VENTE, 2024-2040**

Le pricing du kWh produit dans l'espace est défini en fonction du service fourni et de l'urgence de la demande. Le détail est visible en Annexe 5.

### STRUCTURE DES COÛTS OPÉRATIONNELS

La structure de coûts de l'entreprise est concentrée dans la masse salariale et les coûts récurrents de maintenance sur l'infrastructure installée. En effet, les centrales et les satellites relais nécessitent une maintenance régulière mais coûteuse à cause de leur emplacement en orbite qui demande des missions dédiées. Par ailleurs, lors des premières années de SATCHARGE, la majorité des coûts sont concentrés dans les efforts de recherche et de développement quantifiés par la somme des salaires des chercheurs, techniciens, opérateurs, et spécialistes du nucléaire et du spatial.



**FIGURE 6.2. CROISSANCE ANNUELLE DES REVENUS, COGS, ET OPEX, 2024-2040**

Pour assurer la viabilité de SATCHARGE, nous nous sommes assurés que la croissance des operating expenses et des cost of goods sold demeuraient inférieurs à la croissance des revenus. Après 2030, nous remarquons que la croissance des revenus est en moyenne de 70% alors que celles des OpEx et des COGS sont en-dessous à 42% et 19% respectivement.

### CAPEX ET STRATÉGIE FINANCIÈRE

La nature du business model de SATCHARGE implique des investissements en infrastructure massifs difficiles à financer au travers des simples revenus générés. Notre CAPEX est estimé à plus de 5.2 milliards de dollars d'ici 2040 avec une majorité dûe au déploiement de 3000 satellites relais (82%), les microréacteurs (13%), et les lancements (5%).

Notre stratégie de financement consiste à cibler les subventions étatiques de la NASA, ESA, et d'autres institutions pour amortir les coûts de R&D entre 2024 et 2030. En parallèle, nous travaillerons avec des investisseurs aux cours des différentes étapes de notre développement à la fois pour nous soutenir financièrement et nous guider stratégiquement.

Financement	Date	Equity Share	Retour sur Investissement
Angel Investors	2025	10%	x700
Série A	2026	25%	x175
Série B	2027	20%	x9.3
Série C	2028	20%	x4
IPO	2030	22.5%	/

**FIGURE 6.3. RÉCAPITULATIF DES INVESTISSEURS (TYPES, DATES, EQUITY SHARE, ROI)**

## 7. LÉGISLATIONS ET LOBBYING

### CONTRAINTES LÉGALES

Si notre projet est porté par des motivations environnementales et qu'il pourrait aussi bien contribuer à la réduction du nombre de débris en orbite qu'à une minimisation de la masse individuelle des satellites en orbite, il repose sur l'utilisation de centrales nucléaires dans un cadre réglementé.

Bien que l'**UNSOOA** contraigne l'usage de nucléaire en orbite, particulièrement en LEO, nous planifions en fin de vie des centrales (>30 ans) un placement en orbite très haute grâce au restant d'énergie et au propulseur électrique haute puissance (conformément à l'article 2.a.iii, principes) (type MPD - Propulseur magnétoplasmodynamique). Par ailleurs, l'utilisation d'Uranium 235 comme isotope est obligatoire. Il est à noter que les agences incitent à un usage d'uranium 235 non enrichi dans le contexte géopolitique international. Il semble néanmoins complexe de l'appliquer à notre cas d'étude.

Afin de s'assurer que les autorités approuvent le lancement de la centrale, celle-ci devra disposer non seulement d'un système de sûreté mais également de sauvegarde, afin d'éviter toute prise de risque. Par ailleurs, le lanceur Starship devra jouir d'une réputation lui permettant d'envoyer un réacteur chargé d'uranium, sans risque de retour sur Terre.

**Quoi qu'il en soit**, l'usage de combustibles nucléaires dans l'espace est un préalable aux missions de demain, vers Mars principalement. Nous inscrivons notre projet dans l'ère du spatial de demain, et devons considérer d'importants efforts de lobbying auprès des gouvernements (USA, UE, ...) et institutions non gouvernementales contrôlant l'usage d'armements nucléaires (AIEA).

Par ailleurs, il sera également primordial d'engager de pareilles discussions quant à l'usage de laser dans l'espace, dans le respect des réglementations (un usage commercial et scientifique et non militaire), comme pour la sélection des fréquences d'échange des relais [1].

### SOUTIENS INSTITUTIONNELS

Tout au long de l'élaboration de notre projet (conception, industrialisation, recherche de partenaires, ...), nous veillerons à collaborer avec les agences spatiales majeures, telles l'ESA, la NASA, la JASA.

Celles-ci disposent de programme de soutien aux projets visant à nettoyer l'espace, comme *Clean Space* (ESA), lancé en 2012, qui a financé divers programmes futurs de nettoyage en 2019 [2].

L'Union Européenne, par l'intermédiaire de la Commission Européenne, dispose du fonds Horizon Europe dédié aux innovations majeures, que nous pourrions alors cibler pour un soutien financier supplémentaire.

En 2022 et 2023, la NASA a soutenu financièrement divers Start-Up ayant les mêmes visées. Par ailleurs, certaines innovations sur lesquelles repose notre solution (transmission micro-ondes, transmission laser, génération d'électricité >1MW en orbite, radiateurs à l'efficacité augmentée) requerront la recherche de soutien d'instituts technologiques privés comme d'universités publiques, à l'image des partenariats publics-privés.

## 8. LETTRE AUX INVESTISSEURS

À la suite de l'analyse du marché et du bilan des solutions technologiques existantes et potentielles, il apparaît clairement que **le secteur spatial est à un tournant** et que les prochaines années d'ici à 2040 seront critiques. La multiplication des satellites en LEO, couplée à la croissance exponentielle des débris spatiaux, pose des **défis considérables en termes de gestion et de durabilité**. Dans ce contexte, le projet mené par SatCharge se positionne non seulement comme une réponse à ces défis, mais également comme une opportunité de **transformer la manière dont l'énergie est produite, distribuée et utilisée en orbite**. Ce projet offre une solution complète, qui répond à la fois aux besoins immédiats de gestion des débris et à ceux d'alimentation en énergie des satellites et donc, s'inscrit dans la logique du **développement durable de l'espace**.

Sur le plan économique, SatCharge propose un modèle d'affaires diversifié, capable de répondre aux besoins des acteurs du secteur spatial à travers des modèles de vente catégories de pricing différentes. Le **service d'alimentation ponctuelle**, fondé sur des modèles de pay-as-you-go ou sur souscription, permet de cibler à la fois les grands opérateurs de mégaconstellations et les petits opérateurs de quelques satellites. Le service de **gestion des débris**, répond aux questions de sécurité des satellites en orbite. Finalement, le **service d'alimentation continue** est la forme aboutie du projet SatCharge créant un réseau fonctionnel de distribution d'électricité dans l'espace couvrant la totalité des satellites en LEO.

Finalement, SatCharge se positionne comme un projet **visionnaire**, qui combine innovation technologique, réponse aux défis environnementaux et opportunités commerciales. **Nous sommes convaincus que SatCharge représente l'avenir de l'industrie spatiale** en révolutionnant les capacités d'autonomie et en multipliant les types de missions des futurs satellites grâce à l'accès direct à l'électricité dans l'espace. Sur le long terme, SatCharge transformera notre approche à l'exploration spatiale et peut être même le transport interplanétaire...

LES FONDATEURS,



*Powering the future of space*

**SATCHARGE** 

---

# BIBLIOGRAPHIE

## 1. Solution

- [1] S. Delbecq, J. Fontane, N. Gourdain, H. Mugnier, T. Planès, et F. Simatos, *Référentiel Aviation et Climat* (ISAE SUPAERO), p. 3-4 (2021).
- [2] P. Médevielle et sénateurs, *Rapport d'office parlementaire sur la décarbonation de l'aérien* (Sénat) (mai 2024).
- [3,4,5] ESA. *Point de situation sur les débris spatiaux*.  
[https://www.esa.int/Space\\_in\\_Member\\_States/France/Point\\_de\\_situation\\_sur\\_les\\_debris\\_spatiaux](https://www.esa.int/Space_in_Member_States/France/Point_de_situation_sur_les_debris_spatiaux). (accès en juin 2024).
- [6] T.J. Colvin, J. Karcz and G. Wusk, *Cost and Benefit Analysis of Orbital Debris Remediation* (NASA OTPS) (mars 2023).
- [7] D. Curnick, *SmallSats: a new technological frontier in ecology and conservation?* (ZSL) (octobre 2021).
- [8,9] ESA. *What is Electric propulsion?*  
[https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Space\\_Engineering\\_Technology/What\\_is\\_Electric\\_propulsion](https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/What_is_Electric_propulsion). (Accès en juillet 2024).
- [10] S. Mazouffre. *Electric propulsion for satellites and spacecraft: established technologies and novel approaches*. (Plasma Sources Science and Technology), 25 (3), pp.033002 (2015).
- [11] L. Pieters. *SPACE-BASED LASER ABLATION FOR SPACE DEBRIS REMOVAL* (TUD) (2021).
- And : E. Bögel et auteurs. *Feasibility Analysis of Small-Size Space Debris Removal in Low-Earth Orbit by Space-Based Laser Ablation*. (ESA-ESOC Conference 2024).
- [12] Airbus. *Solar power beams: a step towards cleaner energy*.  
<https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2022-09-solar-power-beams-a-step-towards-cleaner-energy>. 2022. (Consulté en juillet 2024).

## 3. Faisabilité technologique

- [1] SpaceX et sources croisées (articles de presse, posts X d'Elon Musk).
- [2] R. English. *Technology for Brayton-Cycle Space Powerplants Using Solar and Nuclear Energy*, (NASA) (1986).
- [3] NREL. *Best Research-Cell Efficiency Chart*. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>. (Consulté en août 2024).
- [4] A. Peakman. *The challenges of gas-cooled reactor technology for space propulsion and the development of the JANUS space reactor concept*. (Progress in Nuclear Energy Volume 125, July 2020).
- [5] N. Iwata et auteurs. *Thermal Performance Evaluation of Space Radiator for Single-Phase Mechanically Pumped Fluid Loop* (ARC) (juillet 2021).
- [6] L. Mason. *A Comparison of Brayton and Stirling Space Nuclear Power Systems for Power Levels from 1 Kilowatt to 10 Megawatts* (NASA GRC) (2001).
- [7] V. Michau et N. Védrenne. *LES LASERS ET L'OPTIQUE ADAPTATIVE* (Photoniques.com/ONERA) (2024).

[8] Y. Zheng et auteurs. *Wireless laser power transmission: Recent progress and future challenges* (Space Solar Power and Wireless Transmission Volume 1, Issue 1, June 2024, Pages 17-26).

[9] ESA. *ESA'S ANNUAL SPACE ENVIRONMENT REPORT*, juillet 2024.

[10] Tech Briefs. *Blue Laser Power Beaming for Planetary Exploration*, Janvier 2024.

[11] C. Bonnal. *Des lasers pour modifier la trajectoire des débris spatiaux*, avril 2021.

#### **4. Marché de l'électrique spatial**

[1] Euroconsult. *Satellites to be Built and Launched 26th Edition*.

<https://www.euroconsult-ec.com/press-release/four-tons-of-satellites-to-be-launched-daily-by-2032-demand-concentrates-by-a-handful-of-players/> (Consulté en Juillet 2024)

[2] M. Hanif, F. Nadeem, R. Tariq, U. Rashid. Chapter 4 - Solar thermal energy and photovoltaic systems. *Renewable and Alternative Energy Resources*, Academic Press. 2022.

[3] Dawn Aerospace. *A Comparison of Electric and Chemical Propulsion in the Era of Low Launch Costs*. [https://www.dawnaerospace.com/latest-news/electricorchemical#:~:text=Electric%20propulsion%20systems%20are%20generally%20combination%20is%20cold%2Dgas%20capable.\\*](https://www.dawnaerospace.com/latest-news/electricorchemical#:~:text=Electric%20propulsion%20systems%20are%20generally%20combination%20is%20cold%2Dgas%20capable.*). (Consulté en Aout 2024)

[4] IEA. *Energy System of Brazil*. <https://www.iea.org/countries/brazil> (Consulté en Aout 2024)

[5] ESA. *ESA Space Environment Report 2024*.

[https://www.esa.int/Space\\_Safety/Space\\_Debris/ESA\\_Space\\_Environment\\_Report\\_2024](https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris/ESA_Space_Environment_Report_2024) (Consulté en Aout 2024)

#### **5. Overview du Business Plan**

[1] SpaceX. *Starship*. <https://www.spacex.com/vehicles/starship/> (Consulté en Juillet 2024)

#### **7. Législations et lobbying**

[1] ESA, *ESA commissions world's first space debris removal*, [https://www.esa.int/Space\\_Safety/Clean\\_Space/ESA\\_commissions\\_world\\_s\\_first\\_space\\_debris\\_removal](https://www.esa.int/Space_Safety/Clean_Space/ESA_commissions_world_s_first_space_debris_removal), 2019

[2] B. Weeden, *OVERVIEW OF THE LEGAL AND POLICY CHALLENGES OF ORBITAL DEBRIS REMOVAL* (IAC 2010).

#### **Autres ressources employées**

- P. Jaffe, *Power Beaming and Space Applications*, (USNR) (2022)
- Edmundoptics, *Propagation des faisceaux gaussiens*, <https://www.edmundoptics.fr/knowledge-center/application-notes/lasers/gaussian-beam-propagation/>, consulté en août 2024.
- ONERA, *Première mondiale : l'ONERA établit une liaison optique laser pré-compensée par optique adaptative à plus de 38 000 km (CP)*, juillet 2024.
- NASA, *State-of-the-Art of Small Spacecraft Technology*, Chapters 3 and 7, juillet 2024.

# ANNEXES

## 1. COMPOSITION DE LA CONSTELLATION

Mise en service	Nombre	Type	Puissance	Transmission	Ablation
2030-2038	10	Centrale Nucléaire	14-20MW	Ondes	Laser
2028-2040	3000	Relais PV	0.2MW	Ondes et Laser	-

## 2. CALCUL D'AIRE POUR 14MW DE PV EN ORBITE

$$A = \frac{14\,000\,000\text{ W}}{0,30 \times 1\,366\text{ W/m}^2} \approx 34\,127\text{ m}^2 \quad \text{avec 0,3 efficacité des panneaux solaires}$$

## 3. UTILISATION DE LA CONSTANTE DE STEFAN-BOLTZMANN

$$P = \epsilon\sigma AT^4 \quad \text{avec } \epsilon \text{ émissivité favorable supposée, } T=550\text{K (favorable).}$$

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8}\text{ W/m}^2\text{K}^4 \quad \text{constante de SB.}$$

## 4. ANTENNE SOUPLE

Un récepteur souple et déployable (type rectenna), sur le modèle du télescope Webb et inspiré par un concept présenté par le Pr. Gourinat lors d'un échange préalable à ce travail, nous permettra de minimiser la taille des relais tout en garantissant une antenne de taille suffisante. Un travail portant sur ce sujet met en évidence des contraintes de matériaux en LEO, entre autres. La réception constituerait certainement le point le plus critique du projet.

Source évoquée : K. Carlson, *Design of and Business Case for a Deployable Rectenna for Spacecraft-to-Spacecraft Power Beaming*, (ARC) (2023).

## 5. PRICING EN FONCTION DU MODÈLE DE VENTE

Service	Prix / kWh
<i>Pay-as-you-go</i>	\$150
<i>Souscription</i>	\$100
<i>Institutional Clean Up</i>	\$75
<i>Private Clean Up</i>	\$100
<i>Emergency Ablation</i>	\$250
<i>Alimentation Continue</i>	\$100