

Projet StarRoad : corridor électromagnétique de lancement Terre-espace de classe superlourde

Sommaire

Navigation : [début](#) | [sommaire](#) | [fin](#)

1. Description, caractéristiques principales, capacités et philosophie

[1.1. Philosophie fondamentale du projet](#)

[1.2. Capacités](#)

2. Avantages et justifications techniques, économiques, géographiques et stratégiques

[2.1. Techniques](#)

[2.2. Économiques](#)

[2.3. Géographiques](#)

[2.4. Stratégiques](#)

3. Base industrielle et technologique

[3.1. Lévitiation et accélération magnétiques \(maglev\)](#)

[3.2. Technologies supraconductrices et architecture distribuée](#)

[3.3. Puissance pulsée](#)

[3.4. Technologies du vide](#)

[3.5. Aérodynamique hypersonique et protection thermique](#)

[3.6. Systèmes d'énergie nucléaire](#)

[3.7. Construction des tunnels](#)

[3.8. Système géothermique autonome d'énergie thermique](#)

[3.9. Combustion supersonique](#)

[3.10. Cycle fermé du combustible du portail](#)

[3.11. Stratégie de validation des technologies](#)

4. Description détaillée et progressive des éléments et technologies de StarRoad

[4.1. Tunnel d'accélération et infrastructures associées](#)

[4.2. Portail atmosphérique \(terminal d'altitude\)](#)

[4.3. Navette \(AstroLiner\)](#)

5. Cycle d'exploitation, de la préparation au départ à la maintenance après amerrissage

[5.1. Préparation et départ](#)

[5.2. Accélération dans le tunnel](#)

[5.3. Sortie par le portail atmosphérique](#)

[5.4. Traversée de l'atmosphère](#)

[5.5. Arrivée dans l'espace et opérations orbitales](#)

[5.6. Désorbitation et retour](#)

[5.7. Amerrissage](#)

[5.8. Remorquage et maintenance](#)

6. Réalisation, calendrier, exigences et centres industriels

[6.1. Phases du projet](#)

[6.2. Centres industriels](#)

[6.3. Calendrier général](#)

7. Problèmes et missions traités

[7.1. Surchauffe mondiale](#)

[7.2. Mission économique](#)

[7.3. Objectif stratégique](#)

[7.4. Catalyseur technologique](#)

[7.5. Autonomie énergétique et thermique](#)

[7.6. Empreinte carbone](#)

[7.7. Potentiel social et environnemental du canal magistral hydrothermal](#)

- [7.8. Réseau énergétique](#)
- [7.9. StarRoad comme artère économique](#)
- [7.10. Sécurité des infrastructures critiques](#)
- [7.11. Choix du site et possibilité d'extension](#)
- [7.12. Coordination politique et juridique d'un projet transcontinental](#)
- [7.13. Croissance progressive du flux de fret](#)

[8. Marchés et logistique orbitale](#)

- [8.1. Le problème de la demande pour les lancements super lourds](#)
- [8.2. Marché initial : énergie solaire spatiale et centres de données orbitaux](#)
- [8.3. Logique climatique et industrielle du solaire spatial](#)
- [8.4. Sites orbitaux : GEO et EML4/5](#)
- [8.5. Stade initial : vols directs d'AstroLiner-S](#)
- [8.6. Stade de maturité : relais micro-ondes et infrastructures de service](#)
- [8.7. Répartition des transports selon le milieu d'exploitation](#)
- [8.8. Rôle d'AstroLiner dans une logistique arrivée à maturité](#)
- [8.9. transports et remorqueurs interorbitaux](#)
- [8.10. Descente vers la Terre et les autres planètes](#)
- [8.11. Modules normalisés](#)
- [8.12. Hiérarchie des infrastructures orbitales](#)
- [8.13. Chantiers spatiaux](#)
- [8.14. Habitats orbitaux et lunaires](#)
- [8.15. Analogie logistique : l'espace comme réseau maritime](#)
- [8.16. Économie des flux de fret](#)
- [8.17. Étapes du développement des marchés et de la logistique](#)
- [8.18. Perspectives d'évolution : le successeur de StarRoad](#)
- [8.19. Potentiel d'ingénierie planétaire : le Système solaire comme ensemble de ressources](#)
- [8.20. Conclusion stratégique](#)

[9. Modèle économique du projet](#)

- [9.1. Méthode et hypothèses principales](#)
- [9.2. Coût du creusement dans les conditions africaines](#)
- [9.3. Parc de tunneliers avec production interne](#)
- [9.4. Système géothermique autonome d'énergie thermique](#)
- [9.5. Système de stockage d'énergie](#)
- [9.6. Pôles industriels et logistique](#)
- [9.7. R&D et prototypage — Phase 0](#)
- [9.8. Synthèse finale du CAPEX](#)
- [9.9. Répartition par phase \(milliards USD\)](#)
- [9.10. Retour sur investissement et évolution du coût de transport](#)
- [9.11. Comparaison avec les autres solutions](#)
- [9.12. Conclusion économique](#)

[10. Sécurité et modes de fonctionnement d'urgence](#)

- [10.1. Philosophie de sécurité : aucune panne isolée n'est fatale](#)
- [10.2. Principaux risques et dispositifs de protection](#)
- [10.3. Hiérarchie des protocoles d'urgence](#)
- [10.4. Dispositions structurelles de survie](#)
- [10.5. Effets acoustiques et onde de choc](#)

[11. Influence culturelle et psychologique](#)

- [11.1. Le spectacle comme phénomène](#)
- [11.2. Résonance psychologique et symbolique](#)
- [11.3. Conséquences socioéconomiques](#)

[12. Conclusion](#)

1. Description, caractéristiques principales, capacités et philosophie

StarRoad est un complexe de transport magistral Terre-espace à très longue distance, organisé autour d'un accélérateur maglev sous vide de plus de 2 050 kilomètres. Il est destiné à envoyer dans l'espace des navettes autonomes, réutilisables et superlourdes pouvant atteindre 15 000 tonnes, sans emporter de propergol réactif pour le départ.

1.1. Philosophie fondamentale du projet

Changer le paradigme des lancements spatiaux :

- **Traversée inertielle de l'atmosphère.** Au lieu de vaincre l'atmosphère par la poussée et la finesse aérodynamique, StarRoad utilise l'énergie cinétique emmagasinée dans la masse d'une navette accélérée sous vide à une vitesse hypersonique d'environ 11 km/s. L'atmosphère est entièrement traversée par inertie en 50 à 60 secondes.
- **La masse comme avantage.** Une masse élevée — plusieurs milliers de tonnes — cesse d'être un ennemi et devient le support d'une énergie cinétique immense, tout en autorisant l'emploi de matériaux très résistants et réfractaires pour la structure et la protection thermique.
- **Séparation des fonctions.** L'infrastructure énergétique, l'accélération et le pilotage de précision sont confiés au complexe terrestre et deviennent un système d'ingénierie fixe. La navette devient un module de transport spécialisé, optimisé pour le fret, les manœuvres orbitales et le retour.
- **Industrialisation extensible.** Le système n'est pas conçu comme un ouvrage isolé, mais comme la première ligne d'un « chemin de fer » spatial. Des tunnels parallèles, redondants ou supplémentaires pourront être construits, faisant croître le débit de façon exponentielle tout en abaissant les coûts.

1.2. Capacités

- **Accès direct au-delà de l'orbite géostationnaire.** Une vitesse initiale proche de 11 km/s, augmentée d'environ 0,465 km/s par la rotation équatoriale de la Terre, permet à la navette de rejoindre presque directement des destinations à haute énergie, telles que les points de Lagrange L1/L2 des systèmes Terre-Soleil ou Terre-Lune, avec peu de corrections. Le remorquage et le ravitaillement en orbite basse peuvent ainsi être supprimés.
- **Capacité d'export.** Plusieurs milliers de tonnes peuvent être livrées en un seul vol. La construction de centrales orbitales gigawattiques, d'habitats spatiaux, de complexes d'extraction, de traitement, d'assemblage et de production, de systèmes de défense planétaire et de vaisseaux interplanétaires devient alors économiquement justifiée.
- **Coût.** À pleine utilisation, le coût calculé d'acheminement vers les orbites hautes pourrait tomber à **1–10 dollars par kilogramme**, soit plusieurs ordres de grandeur sous les systèmes de lancement actuels ou projetés.

2. Avantages et justifications techniques, économiques, géographiques et stratégiques

2.1. Techniques

La plupart des solutions alternatives de lancement orbital ne butent pas sur la possibilité physique de les construire, mais sur leurs contraintes d'exploitation : fonctionnement continu, soutien dynamique actif, fiabilité irréaliste et conséquences catastrophiques des pannes. Les mégastructures cinétiques actives exigent une alimentation et une stabilisation dynamique permanentes ; si l'énergie ou le contrôle disparaît, la structure perd son soutien et entre dans un régime d'accident potentiellement catastrophique. Les longs tubes extérieurs sous vide imposent aussi des exigences extrêmes d'étanchéité, de sectionnement et de stabilité thermique. StarRoad se distingue par des infrastructures essentielles souterraines, compatibles avec un fonctionnement impulsif, la localisation des incidents et une stabilité passive. Il constitue ainsi la forme minimale réalisable d'une voie magistrale de transport au-delà de la Terre. L'emploi de technologies réelles — transport sous vide, aérodynamique hypersonique, énergie impulsif et supraconducteurs — adaptées à l'échelle de StarRoad renforce encore son réalisme.

2.2. Économiques

Les principaux coûts sont le capital de construction et l'énergie. L'absence d'étages consommables et la quantité minimale de fluide de travail nécessaire au départ réduisent radicalement les dépenses d'exploitation. Le projet stimule aussi le développement régional, de nouveaux réseaux énergétiques et des pôles de haute technologie.

L'évaluation économique de StarRoad doit tenir compte de l'échelle des infrastructures mondiales de transport et d'énergie. À l'échelle du fret annuel mondial, quelques millions de tonnes représentent une part négligeable, tandis que des investissements de plusieurs centaines de milliards de dollars sont courants pour une infrastructure planétaire. StarRoad ne concurrence donc pas les transports existants : il occupe la niche d'une artère à haute énergie qui ajoute de nouvelles fonctions avec un effet limité sur le trafic mondial total.

2.3. Géographiques

Le tracé entre l'embouchure de la Nyanga au Gabon, le mont Mohi et le plateau méridional en République démocratique du Congo est presque idéal :

- **Équateur.** Gain maximal dû à la rotation terrestre et correction minimale de l'inclinaison orbitale.
 - **Visibilité directe.** Trajectoire relativement rectiligne à travers des régions peu peuplées d'Afrique centrale.
 - **Altitude du portail.** À 3 400 mètres, la densité atmosphérique au point de sortie diminue de 30 %, ce qui atténue les charges thermiques et de choc.
 - **Stabilité sismique.** L'activité du rift est-africain est minimale dans cette zone.
 - **Logistique.** Le départ se situe près de l'océan — production et retour des navettes — et l'arrivée en altitude.
- **Tracé et site optimaux : environ 2 050 km entre l'embouchure de la Nyanga au Gabon et le mont Mohi en République démocratique du Congo.** Un départ depuis la **côte gabonaise donne une inclinaison orbitale** équatoriale presque idéale d'environ 3°, un accès direct à l'orbite géostationnaire et aux points de Lagrange, et minimise le coût des transferts interplanétaires. **Le complexe du portail** se trouve sur le mont Mohi, vers 3 400 m, et le vaste plateau méridional est réservé à l'extension. Le site réunit altitude, terrain plat, éloignement supérieur à 20 km des localités et proximité des lacs Tanganyika et Kivu.
 - **Implantation de secours.** Un tracé d'environ 1 850 km entre le port de Kitomb et le mont Mohi, **entièrement** situé en République démocratique du Congo, simplifierait la logistique et la coordination juridique. Il imposerait toutefois une **inclinaison orbitale** d'environ 13° et un supplément **de vitesse de 200 à 300 m/s** pour atteindre l'orbite géostationnaire à 0° ou les points de Lagrange, soit une **perte de 2 à 4 % de charge utile** à chaque lancement. Le choix plus complexe d'une ligne internationale équatoriale, **inclivée d'environ 3°, est donc** stratégique : il maximise l'efficacité sur toute la durée de vie de la voie et donne un accès direct à tous les nœuds critiques de l'infrastructure orbitale.

2.4. Stratégiques

Création d'une artère spatiale permanente, indépendante des conditions météorologiques. À terme, un réseau de lignes de ce type devient une infrastructure mondiale, une assurance pour la civilisation — avec un potentiel d'évacuation massive — et le socle d'une industrialisation spatiale complète, déplaçant hors de la Terre les activités très énergivores et fortement dissipatrices de chaleur.

Même si les systèmes-fusées atteignent les coûts de lancement extrêmement bas annoncés, un tir reste un événement ponctuel au débit limité. Quels que soient leurs prix au kilogramme, les fusées relèvent donc par nature d'une logistique expéditionnaire. StarRoad est une voie d'infrastructure visant non seulement à réduire le coût d'un lancement, mais à établir un flux de fret stable et continu.

3. Base industrielle et technologique

StarRoad n'exige aucune nouvelle loi de la physique, mais porte à son sommet l'intégration de technologies existantes et émergentes :

3.1. Lévitiation et accélération magnétiques (maglev)

Le projet s'appuie sur l'expérience de la Chine, du Japon et de l'Allemagne. Les accélérations record obtenues lors d'essais maglev chinois — une tonne portée de 0 à 700 km/h en deux secondes — démontrent qu'il est possible, en principe, d'accélérer rapidement des masses importantes.

3.2. Technologies supraconductrices et architecture distribuée

StarRoad adopte une architecture inversée : les aimants supraconducteurs qui créent le champ principal de lévitation et de stabilisation sont embarqués sur la navette et refroidis par ses systèmes cryogéniques. Le tunnel ne contient que des enroulements-« rails » relativement simples et peu coûteux en cuivre ou en aluminium, servant de guides passifs et de circuit secondaire pour transmettre l'énergie impulsioneuse d'accélération. Cette solution réduit de plusieurs ordres de grandeur le coût et la complexité du tunnel et concentre la difficulté technique sur l'élément réutilisable — la navette — où elle est entretenue de manière centralisée.

3.3. Puissance pulsée

Des stations de supercondensateurs et de batteries réparties le long du tracé sont chargées par le réseau géothermique autonome et délivrent des impulsions gigawattiques au segment requis de l'accélérateur.

3.4. Technologies du vide

Expérience du Grand collisionneur de hadrons du CERN, de SpinLaunch et des tubes sous vide Hyperloop.

3.5. Aérodynamique hypersonique et protection thermique

Connaissances acquises avec les engins spatiaux, les véhicules de rentrée manœuvrants et des projets tels que SpaceX Starship ; refroidissement actif et accumulateurs thermiques à changement de phase.

3.6. Systèmes d'énergie nucléaire

Réacteurs embarqués compacts — génération suivante après les générateurs thermoélectriques à radio-isotopes — ou futurs modules de fusion, tels que ceux d'Helion Energy, pour alimenter la navette en orbite.

3.7. Construction des tunnels

Tunneliers modernes capables de progresser de plusieurs dizaines de kilomètres par an, avec plusieurs tunnels creusés en parallèle.

3.8. Système géothermique autonome d'énergie thermique

Le projet comprend une infrastructure énergétique et climatique intégrée, propre à StarRoad et de classe gigawatt, fondée sur une technologie modifiée de systèmes géothermiques stimulés (EGS). Le fluide de travail est du dioxyde de carbone supercritique (sCO₂) obtenu par captage direct dans l'air (DAC). Le système remplit trois fonctions critiques : 1) piloter activement le champ thermique géothermique pour stabiliser la température du tunnel d'accélération ; 2) produire une électricité de base ; 3) retirer durablement du CO₂ de l'atmosphère.

3.9. Combustion supersonique

La barrière gazodynamique du portail emploie des moteurs à réaction supersoniques annulaires fonctionnant avec un mélange air-hydrogène. La combustion supersonique forme un flux conique stable dirigé vers l'extérieur dans l'axe du tunnel ; il repousse l'air atmosphérique et crée un gradient de pression qui protège le vide de l'accélérateur pendant le passage de la navette.

3.10. Cycle fermé du combustible du portail

La barrière gazodynamique utilise un combustible propre et renouvelable. L'électrolyse produit l'hydrogène à partir de l'eau et les moteurs utilisent l'air ambiant comme comburant. Le principal produit de combustion est de la vapeur d'eau surchauffée. Il n'est donc plus nécessaire d'acheminer et de stocker de grandes quantités de combustible chimique sur un site montagneux isolé, ce qui améliore la fiabilité et réduit les coûts d'exploitation.

3.11. Stratégie de validation des technologies

Le projet avance selon deux axes parallèles : modélisation mathématique et essais réels des organes critiques. Cette démarche confirme tôt la viabilité du concept, fournit des données d'ingénierie précises et réduit les risques du projet principal.

4. Description détaillée et progressive des éléments et technologies de StarRoad

4.1. Tunnel d'accélération et infrastructures associées

- **Longueur** : environ 2 050 km.
- **Section**. Elliptique ($\sim 17,5 \times 12,5$ m), optimisée pour la forme aérodynamique de la navette et la stabilité de la lévitation magnétique.
- **Profondeur du tunnel** : **jusqu'à** environ 8 km, voire davantage si la géologie et la température le permettent. La profondeur admissible ne pourra être arrêtée qu'après une reconnaissance géologique détaillée : forages le long du tracé, profil thermique, état de contrainte, fracturation et hydrogéologie. Plus la température et le flux thermique des couches profondes sont faibles — jusqu'à environ 200–250 °C à titre indicatif — plus la plage de profondeurs réalisables est large et plus la géométrie du tracé peut être optimisée. Des rayons de courbure et des raccordements mieux choisis réduisent alors les pointes d'accélération et les charges dynamiques tout en conservant la vitesse visée.
- **Construction** : mixte. La section initiale, d'environ 330 km, est une droite souterraine à faible pente qui descend directement vers le portail afin de simplifier l'accélération. Le reste est un tunnel profond ou souterrain assurant stabilité thermique, isolement sous vide et sécurité.
- **Géométrie du tracé** : courbe en S après environ 330 km.
 - **Arc descendant** : **rayon** d'environ 6 300 km, amenant progressivement le tunnel en profondeur pour obtenir l'angle requis.
 - **Arc ascendant** : **rayon** de 2 500 à 3 500 km, ramenant le tunnel au portail avec une pente d'environ 5 à 6° sur l'horizontale. Les rayons sont calculés pour maintenir l'accélération centripète sous 4 g à vitesse hypersonique.
- **Système de vide** : **segmenté**. Chaque segment d'environ 50 km est autonome et dispose de ses propres pompes à vide, capteurs et vannes d'urgence.

4.1.1. Système d'accélération

L'accélération et la stabilisation résultent de l'interaction entre les aimants supraconducteurs embarqués et des entraînements électromagnétiques linéaires répartis dans le tunnel. Ces entraînements sont des enroulements passifs segmentés en conducteurs ordinaires — cuivre ou aluminium — et ne nécessitent aucun refroidissement cryogénique.

- **Dans la section initiale du tunnel, de 0 à 330 km** : les **entraînements se trouvent surtout sous** la voie. Ils créent le champ nécessaire à la lévitation, à l'accélération initiale à 4 g et à la compensation active de la gravité.
- **Dans la section médiane, de 330 à 2 000 km, notamment dans la courbe en S** : les **entraînements** entourent le tunnel. Ils assurent l'accélération de précision, maintiennent la navette au centre à vitesse hypersonique et stabilisent sa trajectoire dans les virages. Sur le plancher de la partie finale, où les accélérations radiales sont élevées, les enroulements sont renforcés et volontairement surdimensionnés. Entre 330 et 2 000 km, l'accélération décroît suivant une courbe, de 4 g au début à 0 g à la fin, tandis que la vitesse atteint environ 11 km/s.
- **Dans la dernière section, de 2 000 à 2 050 km** : les 50 derniers kilomètres servent à stabiliser et centrer la navette avant son passage dans l'atmosphère par le portail atmosphérique. Il n'y a plus d'accélération sur cette section.

L'énergie impulsionnelle fournie par les sous-stations du système géothermique autonome alimente chaque segment d'enroulement en synchronisation exacte **avec la position de la navette**. Le champ magnétique progressif ainsi créé interagit avec les aimants embarqués et accélère l'appareil. Cette architecture simplifie le tunnel, facilite sa maintenance et concentre les éléments de haute technologie sur la navette réutilisable.

4.1.2. Système géothermique autonome d'énergie thermique

Afin de garantir stabilité thermique, autonomie énergétique et longévité, chaque tunnel d'accélération est accompagné de sept tunnels de service de petit diamètre. Ensemble, ils forment le système géothermique autonome d'énergie thermique, ci-après « système géothermique autonome » :

- **Six tunnels collecteurs et énergétiques principaux de 2 m de diamètre**. Ils se trouvent 30 m sous le radier du tunnel d'accélération, avec un entraxe régulier de 7 m. Ils fonctionnent par paires en circulation réversible de CO₂

supercritique fortement sous-refroidi à +5 °C. Cette disposition forme, sous toute la section de l'accélérateur, une dalle rocheuse refroidie continue de plus de 15 m d'épaisseur, sans pont thermique.

- **Un tunnel technique de service de 3 m de diamètre** . Situé au même niveau que l'accélérateur et décalé latéralement de 3 m, il donne un accès permanent au diagnostic et à la réparation sans interrompre le trafic. Les tunnels du système géothermique autonome résistent simultanément à une pression interne allant jusqu'à 25 MPa, à la pression des terrains et **aux charges dynamiques**. **Une flotte entièrement robotisée de microtunneliers creuse les sept ouvrages**. **Le système sépare physiquement** et fonctionnellement l'infrastructure énergétique de l'infrastructure de transport, ce qui assure une fiabilité et une maintenabilité exceptionnelles.

4.1.3. Refroidissement du système géothermique autonome d'énergie thermique

- **Circuit de refroidissement** profond. Sous l'accélérateur, les tunnels collecteurs du système géothermique autonome font circuler un fluide à base de CO₂ sous forme dense à haute pression ou supercritique. En régime normal à basse température, le flux froid entre dans les collecteurs à environ +5...+15 °C. Après avoir absorbé la chaleur géothermique, le CO₂ peut dépasser +100 °C selon la profondeur, le flux thermique de la roche et le régime de production électrique. Le circuit évacue cette chaleur, crée une zone refroidie sous le tunnel principal et permet de construire en sécurité à quelque 5–8 km de profondeur.
- **Canal magistral hydrothermal** . **Construit** parallèlement à la voie StarRoad, à la route de service, à la ligne électrique et aux communications, ce canal relie les terminaux en un système unique d'évacuation thermique de surface.

Le canal mesure environ 5–8 m de large et 2–3 m de profondeur. Plusieurs conduites serpentes indépendantes à haute pression reposent sur son fond et transportent le CO₂ entre terminaux voisins. L'eau sert de tampon thermique et de caloporteur intermédiaire.

Après les turbines, échangeurs ou compresseurs, le CO₂ pénètre dans les serpentins à environ +50...+80 °C. Sur une section d'environ 50 km entre deux terminaux, il cède sa chaleur à l'eau et se refroidit à quelque +22...+35 °C selon la saison, l'humidité, l'intensité des pluies, le rayonnement nocturne vers le ciel et le régime du canal.

En fonctionnement normal, l'eau du canal est maintenue autour de +22...+32 °C et atteint localement +35...+45 °C dans les sections chaudes. Près de l'entrée du flux chaud, elle peut brièvement monter à +50...+80 °C, ce qui peut réduire une partie de l'activité biologique, mais ne la rend pas potable sans traitement.

Des couvertures sélectives légères surmontent le canal : elles réfléchissent le rayonnement solaire tout en laissant la chaleur s'évacuer dans l'infrarouge.

- **Refroidissement aux terminaux**. Chaque terminal dispose de tours aéroréfrigérantes, échangeurs, pompes, compresseurs d'appoint, turbodétendeurs et groupes frigorifiques de secours. En régime normal, le canal rejette passivement la majeure partie de la chaleur à basse température.

Les tours aéroréfrigérantes et échangeurs terminaux font passer le CO₂, après le canal, d'environ +22...+35 °C à +15...+25 °C. Si nécessaire, les groupes frigorifiques de secours l'abaissent à –5...+5 °C avant les collecteurs profonds. Ils servent aux pointes, aux urgences ou aux saisons défavorables, non au régime principal continu.

- **Compression d'appoint et turbodétente**. Le CO₂ refroidi arrive au terminal suivant sous pression accrue. Il peut ensuite traverser un turbodétendeur, qui récupère une partie du travail de compression et abaisse encore la température par détente, jusqu'à environ –10...+5 °C selon la pression, le débit et l'état de phase recherché.

Le CO₂ entre ensuite dans les collecteurs géothermiques à la température, à la pression et dans l'état de phase requis. Ce cycle ne crée pas d'énergie gratuite : le compresseur fournit du travail, le canal rejette la chaleur de compression et le turbodétendeur ne récupère qu'une partie de l'énergie dépensée. Le gain utile est un fluide plus froid qui sollicite moins la réfrigération active.

- **Redondance et circulation bidirectionnelle**. Les serpentins sont doublés et réversibles. Si un circuit est endommagé, le débit est reporté vers une conduite de secours ou un terminal voisin. Le sens du CO₂ varie avec la charge thermique, l'état d'urgence et la disponibilité des sections.
- **Maintenabilité**. Des vannes segmentent le canal environ tous les kilomètres. En cas d'endommagement, le segment est isolé, pompé jusqu'au niveau technique minimal ou partiellement asséché. Après dépressurisation, équipes ou robots accèdent aux serpentins sans arrêter toute la ligne. Pendant les travaux, les circuits de réserve, l'inversion du

débit, les échanges renforcés dans les terminaux voisins et l'activation temporaire des groupes frigorifiques maintiennent le refroidissement.

- **Fonction hydrique limitée.** À titre secondaire, une pente régulière d'est en ouest permet au canal d'entretenir un lent écoulement gravitaire, de rincer ses sections et de rejeter l'excédent de façon contrôlée.

Les pluies équatoriales nocturnes peuvent alimenter le canal par des bassins versants, décanteurs, filtres et déversoirs. Comme l'eau n'entre jamais en contact direct avec le CO₂, un traitement local permet de l'employer pour une irrigation limitée, les besoins techniques des terminaux, les réserves incendie et les ceintures végétales de protection.

Cette fonction reste secondaire : aucun prélèvement ne doit compromettre la mission première du canal, à savoir refroidir le CO₂ et maintenir la stabilité thermique du système géothermique autonome.

- **Rôle pour StarRoad.** Collecteurs profonds, canal hydrothermal, refroidisseurs terminaux, tours aéroréfrigérantes, compresseurs d'appoint, turbodétendeurs et groupes frigorifiques de secours forment un système distribué unique de gestion thermique. Il réduit la dépendance aux machines frigorifiques locales, améliore la tolérance aux pannes, redistribue les flux thermiques entre terminaux et rend plus réaliste la construction profonde de l'accélérateur.

Le refroidissement de surface renforce aussi le rôle économique de StarRoad : une bande linéaire de terminaux, routes de service, nœuds énergétiques, canal, zones industrielles et terres agricoles irriguées se développe le long du tracé.

4.1.4. Importance stratégique du système géothermique

Au-delà de l'énergie et de la stabilisation thermique, le système rend possible un tunnel d'accélération principal très profond — 5 à 8 km ou davantage — dans des conditions sûres et économiques. La maîtrise active du champ thermique et l'extraction de la chaleur géothermique lèvent les limites de température qui interdiraient autrement cette profondeur. Il devient alors possible de construire la géométrie en S optimale, à grands rayons, nécessaire pour remonter progressivement et faire sortir la navette sous un angle de 5 à 6° tout en maintenant les accélérations du fret et de l'équipage autour de 4 g sur 2 050 km. Le système géothermique autonome fonde donc non seulement l'énergie, mais toute l'optimisation balistique de StarRoad. Une flotte entièrement robotisée de microtunneliers creuse l'ensemble.

4.1.5. Réseau de tunnels techniques latéraux perpendiculaires

Pour la construction, la ventilation, les réparations et l'évacuation, 40 tunnels de transport inclinés sont construits tous les 50 km le long du tracé. Inclinés à 30° et de section elliptique d'environ 17,5 × 12,5 m, ils sont creusés avec les mêmes tunneliers que la voie principale et relient la surface à celle-ci jusqu'à 8 km de profondeur.

- **Logistique** : ils offrent au personnel et à l'équipage une voie d'évacuation indépendante lors d'un arrêt d'urgence Alarm-2. Contrairement à un puits vertical, un tunnel incliné permet à des véhicules autonomes d'évacuer plusieurs dizaines de personnes en un seul trajet.
- **Sécurité** : ils constituent une seconde voie d'évacuation indépendante pour le personnel et l'équipage lors d'un arrêt d'urgence Alarm-2.
- **Évolutivité** : les tunnels inclinés préparent le raccordement de futures lignes StarRoad parallèles. Des branches horizontales pourront partir de ces accès vers de nouveaux accélérateurs, transformant le réseau en ossature de transport extensible.
- **Intégration au système géothermique autonome.** Des tunnels collecteurs sont percés 10 à 20 m plus bas sous chaque accès incliné. Ils servent à précongeler et stabiliser la roche pendant le chantier, puis à produire de l'énergie.
- **Complexe terminal de surface.** Chaque tunnel incliné aboutit à un terminal multifonction. Chacun des 40 terminaux constitue un nœud indépendant comprenant :
 - **un ensemble de ventilation et d' épuration** des gaz pour maintenir l'air du tunnel et en extraire l'air vicié ;
 - **une base de chantier** avec des zones de dépôt, de transbordement et de stockage temporaire des modules, déblais et matériaux ;
 - **un bâtiment d'exploitation et de vie** pour les équipes postées, avec salles de contrôle, salles de repos, ateliers et magasins ;

- **une centrale géothermique et des installations de refroidissement** intégrées au réseau géothermique autonome, qui utilisent et pilotent le caloporteur des collecteurs profonds ;
 - **une station de captage et de traitement du CO₂** par captage direct dans l'air (DAC), qui ferme le cycle : le CO₂ extrait est liquéfié, purifié puis injecté comme caloporteur dans les collecteurs profonds ;
 - **un raccordement aux réseaux extérieurs d'électricité et de télécommunications**, assurant alimentation de secours et liaison à haut débit.
 - **des accès** routiers ou ferroviaires au réseau régional ;
 - **un point d'évacuation** en surface doté d'un poste médical d'urgence et d'une hélisurface.
- **Souplesse juridique et environnementale.** Les tunnels de service inclinés permettent d'implanter les terminaux hors des parcs nationaux, réserves et bassins versants protégés, même si StarRoad passe à grande profondeur sous ces zones. Le principal obstacle juridique disparaît sans aucune construction dans les limites des parcs. Chaque terminal est installé sur le terrain non protégé le plus proche et relié par un puits incliné, ce qui simplifie les autorisations, réduit la pression environnementale et élimine les effets directs sur les écosystèmes protégés.

4.1.6. Alimentation et stockage de l'énergie

Le réseau d'alimentation de l'accélérateur StarRoad possède trois niveaux afin d'assurer :

- une redondance garantie, la panne d'un élément isolé n'entraînant pas l'arrêt ;
 - une vitesse de décharge adaptative, de plusieurs secondes au départ à quelques microsecondes en fin de ligne ;
 - des câbles de puissance aussi courts que possible, afin de réduire pertes et inductance.
- **Niveaux de la topologie**
- Niveau 0 : stockages primaires aux terminaux**
- Les 40 terminaux disposent chacun d'un parc de stockages gravitaires, de stations de transfert d'énergie par pompage — microcentrales hydroélectriques sur le canal — et de batteries lithium-ion (BESS).
 - Capacité totale par terminal : environ 5–9 GWh, soit environ 360 GWh pour toute la ligne.
 - Sortie : courant continu haute tension jusqu'à 100 kV, transmis au tunnel technique par des câbles principaux.
- Niveau 1 : contrôleurs des segments de 50 km**
- Le tracé est divisé en 41 segments de 50 km, le dernier couvrant les 50 km qui précèdent le portail.
 - Chaque segment possède un contrôleur principal de distribution alimenté par deux terminaux voisins, ce qui assure une redondance croisée.
 - Ce contrôleur répartit l'énergie entre des blocs énergétiques de 1 km chacun et synchronise leur fonctionnement.
- Niveau 2 : blocs énergétiques kilométriques.** Chaque bloc d'un kilomètre possède un contrôleur local qui :
- reçoit l'énergie du contrôleur de segment ;
 - commande les batteries tampons lithium-ion placées sous les parois du tunnel principal ;
 - commande les ensembles d'enroulements commutables raccordés par des volants d'inertie et des supercondensateurs, installés dans des niches derrière les parois.
- Deux voies indépendantes relient le contrôleur de segment à chaque bloc kilométrique et assurent la redondance.
- **Architecture des chemins de câbles**
- **Câbles principaux, niveau 0→1** : ils sont posés dans le tunnel technique de 3 m qui longe le tunnel principal à 3 m de distance.

- **Distribution le long du tracé** : depuis chaque terminal, les câbles partent sur 50 km dans chaque direction, soit 100 km au total, et recouvrent les zones des terminaux voisins. Chaque segment reçoit donc l'énergie d'au moins deux terminaux, pour une redondance de 100 %.
- **Entrée dans le tunnel principal** : tous les kilomètres, les câbles passent du tunnel technique au tunnel principal par des traversées étanches et rejoignent le contrôleur du bloc kilométrique.
- **Distribution dans le bloc** : après le contrôleur, l'alimentation se divise en deux voies parallèles :
 - voie A** : batteries tampons lithium-ion d'environ 0,5–1 GWh par bloc, qui lissent les pointes de plusieurs secondes ;
 - voie B** : ensembles d'enroulements commutables alimentés par des volants d'inertie et des supercondensateurs installés derrière les parois du tunnel.

- **Adaptation en trois zones du régime de décharge.** Le profil d'accélération est optimisé de façon que la puissance de pointe par jeu d'enroulements soit maximale au début — où des impulsions ultracourtes ne sont pas nécessaires — puis diminue vers la fin du tracé. Trois familles de stockage et de commutation peuvent donc être utilisées selon la zone :

Zone	Section du tracé	Caractère de la décharge	Stockage / commutation	Justification
Zone I — basse vitesse	0–200 km	Secondes à millisecondes	Batteries lithium-ion et onduleurs IGBT standard	La navette est encore lente et met plus de 0,1 s à parcourir un kilomètre. Les batteries BESS peuvent alimenter directement la voie, sans tampon supplémentaire.
Zone II — vitesse moyenne	200–1 000 km	Millisecondes à microsecondes	Batteries lithium-ion tampons, volants d'inertie et onduleurs SiC	La navette accélère ; la commutation doit être plus rapide, mais les volants mécaniques restent utilisables.
Zone III — grande vitesse	1 000–2 000 km	Impulsions de l'ordre de la microseconde	Supercondensateurs et interrupteurs rapides à thyristors GTO/IGCT	Le temps de parcours d'un kilomètre tombe à 0,09 s. Seuls les supercondensateurs à réponse nanoseconde peuvent stabiliser l'impulsion.

Point important : l'énergie requise par kilomètre est plus faible en zone III qu'en zone I, car l'accélération diminue. La charge sur les composants baisse donc malgré les exigences accrues de vitesse de décharge.

- **Redondance et tenue aux incidents**

- **Contrôleurs doublés** : chaque contrôleur de segment et de kilomètre possède une réserve chaude, soit deux cartes identiques avec alimentations indépendantes.
- **Alimentation croisée** : chaque bloc kilométrique peut être alimenté non seulement par son propre contrôleur de segment, mais aussi par les contrôleurs voisins au moyen de câbles de réserve dans le tunnel technique.
- **Redondance locale des enroulements** : chaque bloc kilométrique possède trois ensembles indépendants utilisés à tour de rôle. Si l'un est endommagé, les deux autres poursuivent l'accélération avec un rendement moindre, mais sans arrêt.
- **Coupure d'urgence** : en cas de court-circuit ou de surchauffe, le contrôleur kilométrique coupe son bloc et l'isole au moyen de portes inter-sections, sans affecter les blocs voisins.

- **Réalisation matérielle et synthèse**

Élément	Emplacement	Fonction
Stockages primaires	En surface, dans les terminaux	Stockage d'énergie de longue durée, 360 GWh.
Câbles principaux	Tunnel technique de 3 m	Transport redondant de l'énergie des terminaux vers les segments.
Contrôleurs de segment	Niches du tunnel principal tous les 50 km	Répartition de l'énergie entre 10 blocs kilométriques et synchronisation.
Batteries tampons lithium-ion	Sous les parois du tunnel principal	Lissage des pointes de plusieurs secondes dans les zones I et II.
Volants d'inertie	Derrière les parois du tunnel, en zone II	Tampon pour les impulsions de l'ordre de la milliseconde.

Élément	Emplacement	Fonction
Supercondensateurs	Derrière les parois du tunnel, en zone III	Stabilisation à la microseconde et compensation des creux.
Contrôleurs locaux kilométriques	Dans des niches tous les kilomètres	Commande de la commutation des enroulements, surveillance de l'état et gestion des tampons.
Enroulements de l'accélérateur	Surface intérieure du tunnel	Création du champ magnétique progressif qui accélère la navette.

○ Avantages de l'architecture énergétique

- **Répartition progressive de la charge.** La puissance de pointe n'est jamais demandée simultanément sur toute la longueur : impulsions lentes au début, brèves mais moins puissantes à la fin.
- Redondance à tous les niveaux. La panne d'un terminal, d'un contrôleur ou même d'un segment entier de 50 km n'arrête pas le système : les terminaux et segments voisins compensent l'énergie manquante.
- **Souplesse d'extension.** Ajouter des lignes StarRoad parallèles ne demande pas de reconstruire le système énergétique ; il suffit de poser des câbles principaux supplémentaires dans le tunnel technique existant.
- **Optimisation des coûts.** Les supercondensateurs et volants d'inertie coûteux ne sont employés que dans les dernières sections où ils sont nécessaires ; les batteries lithium-ion moins chères suffisent au début du tracé.

4.2. Portail atmosphérique (terminal d'altitude)

Résout le problème du « dernier kilomètre ».

4.2.1. Implantation et construction

Le complexe du portail est implanté sur le plateau sommital du mont Mohi, à environ 3 400 m d'altitude en République démocratique du Congo. Un vaste plateau situé 16 km plus au sud est réservé à une extension future pouvant accueillir des dizaines de portails parallèles. L'ouvrage massif comprend un obturateur mécanique principal et des systèmes produisant une barrière gazodynamique. Il s'apparente à un moteur à réaction terrestre fixe doté d'une triple tuyère annulaire inclinée vers le ciel, non pour accélérer un véhicule, mais pour repousser l'air atmosphérique et créer un tampon lors de l'entrée de la navette dans l'atmosphère.

4.2.2. Barrière gazodynamique

Élément actif principal. Quelques secondes avant l'arrivée de la navette, le système forme un écoulement gazeux conique et supersonique dirigé vers l'extérieur dans l'axe du tunnel.

- **Source et disposition** : trois moteurs à réaction annulaires concentriques et indépendants, ou des statoréacteurs hypersoniques de configuration équivalente à trois couronnes, entourent l'ouverture du portail. Ils utilisent un mélange air-hydrogène, l'hydrogène étant produit sur place par électrolyse. Deux couronnes quelconques suffisent à créer la barrière, de sorte que l'ensemble reste opérationnel si la troisième tombe en panne. Chacune possède sa propre alimentation en carburant, sa commande et son allumage. Les couronnes sont disposées en gradins autour de la partie extérieure du portail, de la plus petite à la plus grande en retrait. L'obturateur mécanique se trouve à l'intérieur, derrière cette cascade, ce qui permet d'allumer les couronnes avant de l'ouvrir.

○ Fonctions essentielles :

1) créer une pression dirigée vers l'extérieur afin de protéger le vide du tunnel pendant le passage de la navette ;

2) chasser et préchauffer l'air devant la sortie afin d'établir un gradient entre le vide du tunnel et l'atmosphère, et donc une transition progressive entre les deux milieux.

La barrière gazodynamique n'est pas une protection aérodynamique de la navette et ne l'isole pas de l'atmosphère. Elle étale dans le temps le changement de milieu : le choc presque instantané, à l'échelle de la microseconde, contre de l'air froid et immobile devient une charge distribuée sur des millisecondes dans un écoulement chaud et codirectionnel. Les forces aérodynamiques intégrées ne diminuent pas, mais l'à-coup et la composante haute fréquence sont fortement réduits, ce qui limite les risques de rupture locale et de choc thermique.

- **Forme de l'écoulement** : cône à section elliptique correspondant au tunnel et à la navette, long de quelques dizaines à quelques centaines de mètres et projeté vers l'extérieur par les trois rangées de tuyères annulaires du portail.

La barrière gazodynamique du portail n'a pas besoin de former un cône géométriquement parfait, stationnaire ou rigoureusement axisymétrique. Son fonctionnement est intrinsèquement dynamique et tolère des fluctuations temporelles et spatiales de forme, de densité et de vitesse.

La seule condition rigide est de maintenir, pendant toute la sortie, un gradient de pression et de quantité de mouvement positif, donc dirigé vers l'extérieur, qui interdise toute pénétration d'air dans le tunnel. La préparation gazodynamique et thermique préalable de l'atmosphère dans la zone de sortie accroît sensiblement la fiabilité et la faisabilité du système.

La forme de l'écoulement est donc un paramètre adaptatif, non une valeur imposée. Elle est optimisée en temps réel d'après des grandeurs intégrées — pression, débit massique et quantité de mouvement — plutôt que selon une géométrie fixe.

- **Mise à l'échelle et essais** : **contrairement** à l'accélérateur long de milliers de kilomètres, le portail est modulaire et facilement extrapolable. Ses technologies déterminantes — cône gazodynamique supersonique stable, synchronisation et fonctionnement des couronnes propulsives — peuvent être validées intégralement sur des bancs fonctionnels à l'échelle 1:5 ou 1:10. Les principaux risques techniques peuvent ainsi être levés avant la construction de la ligne grande nature.

4.2.3. Système de sécurité

L'emploi d'hydrogène impose des exigences renforcées contre l'incendie et l'explosion. L'infrastructure comprend donc une détection redondante des fuites, une purge inerte des conduites à l'azote, des équipements antidéflagrants, une séparation physique entre électrolyseurs, stockages et couronnes propulsives, ainsi que des conduits de ventilation orientés qui évacuent tout rejet éventuel loin du personnel et des installations critiques.

4.3. Navette (AstroLiner)

4.3.1. Dimensions et masse au lancement

Longueur d'environ 150 m et section elliptique d'environ 10 × 15 m. La forme est celle d'un coin hypersonique optimisé pour réduire la traînée et la charge thermique durant la traversée de l'atmosphère.

- **Masse optimale au lancement** : **environ 15 000 tonnes.**

La masse de 15 000 tonnes résulte d'une optimisation technico-économique située au juste milieu entre contraintes physiques et possibilités de réalisation.

Critère	Limite basse (< 8 000–10 000 t)	Optimum (15 000 t)	Limite haute (> 20 000–25 000 t)
Aérodynamique et accélérations	L'atmosphère domine. La traînée $F_d = \rho \cdot A \cdot v^2$ produit une forte accélération $a = F_d/m$, exige une stabilisation active complexe et entraîne des pointes de charge thermique.	L'inertie domine. La résistance atmosphérique provoque des accélérations initiales brèves, jusqu'à 5 secondes et environ 3 à 6 g, compatibles avec des systèmes d'amortissement et une protection thermique plus simples.	Les accélérations diminuent peu, tandis que d'autres facteurs annulent les avantages attendus.
Régime thermique	Faible capacité thermique. Une petite masse m s'échauffe rapidement selon $\Delta T = Q \cdot t / (m \cdot c)$ et exige des dispositifs de refroidissement actif extrêmes.	Forte inertie thermique. La structure massive absorbe et répartit le pic thermique de la brève traversée atmosphérique, ce qui autorise une protection combinant moyens passifs et actifs.	La capacité thermique augmente, mais l'évacuation de la chaleur d'une structure aussi massive devient un problème distinct.
Énergie de lancement	L'énergie requise $E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ reste acceptable, sans compenser les autres désavantages.	Équilibre raisonnable. Accélérer à 11 km/s demande environ 9×10^{14} J, soit 252 GWh, ce qui correspond aux capacités du système géothermique autonome distribué et de ses stockages.	La dépense énergétique croît linéairement et impose une augmentation disproportionnée de la puissance et de la capacité de stockage, sans intérêt économique.
Construction et logistique	Réalisable, mais sans l'avantage déterminant du « béliet inertiel ».	Compatible avec les techniques existantes. Dimensions et masse restent dans les possibilités des formes de construction	La structure perd en rigidité ; ses modes propres, son assemblage et son acheminement vers le site deviennent

Critère	Limite basse (< 8 000–10 000 t)	Optimum (15 000 t)	Limite haute (> 20 000–25 000 t)
		navale, du soudage industriel et du transport lourd actuels.	problématiques. Les coûts croissent plus vite que la masse.
Principe de StarRoad	Reste dans le paradigme du « véhicule léger », vulnérable à l'atmosphère.	Met en œuvre le paradigme du « bélier inertiel » : l'atmosphère n'est plus une barrière, mais une perturbation brève franchie grâce à la masse et à la résistance structurelle.	Deviens une tâche hors de portée de l'industrie et annule les économies d'échelle.

- **Physiquement** : au-dessus du seuil d'environ 10 000 t à partir duquel l'inertie commence à dominer les effets aérodynamiques.
- **Énergétiquement** : sans croissance exponentielle des besoins d'infrastructure.
- **Techniquement** : dans les limites de pratiques industrielles extensibles, telles que la construction navale et la mécanique lourde.
- **Économiquement** : équilibre entre la baisse du coût de mise en orbite par l'échelle et la maîtrise des dépenses d'investissement.

Cette masse est donc un **optimum calculé qui rend StarRoad physiquement réalisable et économiquement justifiable**.

4.3.2. Agencement et systèmes

Toute l'architecture intérieure est une structure longitudinale à plusieurs niveaux, dont les fonctions sont séparées selon la hauteur du fuselage.

- **Les parties inférieure et arrière** accueillent exclusivement l'énergie et la propulsion : réacteur embarqué, échangeurs, circuits de refroidissement actif, convertisseurs de puissance, stockages d'énergie, conduites de fluide caloporteur et propulsion marine. Cette disposition abaisse le centre de masse, améliore la stabilité en vol hypersonique, en plané et à l'amerrissage, et simplifie la protection thermique et radiologique des compartiments supérieurs.
- **Le système supraconducteur de lévitation et de stabilisation** longe les flancs et occupe une partie du fond. Ses modules sont fixés juste derrière la peau extérieure et la protection thermique, afin de réduire l'entrefer avec les enroulements passifs du tunnel. Les aimants sont répartis :
 - sur toute la longueur des flancs, y compris les zones supérieure et médiane jusqu'à la ligne des portes coulissantes ;
 - dans les parties médiane et arrière du fond ;
 - à l'exclusion des sorties des ailes principales et des logements mécaniques.

Cette répartition produit un champ uniforme, une grande stabilité à vitesse hypersonique et une bonne tolérance aux dommages locaux.

- **La partie médiane** contient les logements des ailes repliables et leur cadre porteur. Les ailes principales se rétractent dans le fuselage et sont isolées des compartiments énergétique et cargo. L'avant de cette zone reçoit de petites surfaces de contrôle escamotables servant à corriger et stabiliser la trajectoire pendant les régimes transitoires.
- **La partie supérieure** accueille un module de charge utile universel et interchangeable. Ses dimensions, points d'ancrage, masse et plage de centrage sont normalisés ; il peut être configuré pour le fret, le ravitaillement, les passagers ou un emploi mixte. Le module est posé et retiré au dock avant le lancement, et peut aussi l'être en orbite après ouverture des portes supérieures. Une plate-forme hydraulique ou électromécanique intégrée et des guides permettent d'extraire automatiquement les modules en microgravité, sans intervention d'équipage.
- **Les portes supérieures** coulissantes ne participent pas à la structure porteuse ; elles servent de carénage aérodynamique et donnent accès à la charge en orbite. Elles intègrent des panneaux radiateurs repliables. Après ouverture et verrouillage complets, les panneaux se déploient automatiquement, puis reçoivent le fluide de refroidissement afin de rayonner la chaleur excédentaire dans le vide.

- **La partie avant de** la navette est organisée sur plusieurs niveaux :
 - zone supérieure : poste de pilotage, commande, navigation et communications ;
 - zone médiane : mécanismes des petites ailes escamotables et surfaces de contrôle ;
 - zone inférieure : réservoirs cryogéniques de carburant et de fluide de refroidissement, agencés pour réduire les pertes hydrauliques et alimenter au plus vite le refroidissement actif du nez pendant la traversée atmosphérique.

Cette disposition raccourcit les circuits thermiques et hydrauliques, réduit l'inertie thermique du nez et fiabilise la protection sur la phase la plus exigeante. Dans son ensemble, la navette suit une architecture rigide, modulaire et extensible, optimisée pour le départ hypersonique, les opérations orbitales, la navigation autonome et les réemplois successifs sans démontage profond du fuselage.

4.3.3. Protection thermique du fuselage

Le nez et le fond reçoivent une protection thermique multicouche, composite et métallique, dimensionnée pour les charges thermiques et dynamiques extrêmes du vol hypersonique puis de l'amerrissage. Elle associe des éléments passifs et actifs :

- une couche externe réfractaire supportant brièvement des températures de plusieurs milliers de degrés et un rayonnement intense ;
- une sous-couche métallique porteuse reprenant les efforts mécaniques et vibratoires ;
- des circuits de refroidissement actif évacuant la chaleur des zones les plus sollicitées, surtout le nez et le bord avant du fond ;
- des éléments ablatifs remplaçables dans les zones critiques, conçus pour s'user de façon contrôlée sans endommager la structure principale.

La protection tient compte du choc thermique lors du contact entre la coque chaude et l'océan, y compris les gradients brusques et les contraintes cycliques. Les éléments les plus sollicités sont segmentés et remplaçables lors de l'entretien courant, ce qui facilite la réparation et prolonge la durée d'utilisation récurrente.

4.3.4. Ailes

Deux paires d'ailes escamotables assurent la stabilisation, le vol plané et l'amerrissage. Elles se déploient lorsque l'appareil atteint les couches raréfiées de l'atmosphère.

- **La paire avant** corrige la trajectoire, stabilise le tangage et le roulis et amortit les perturbations dynamiques. Elle se déploie dans les couches raréfiées pour le vol plané.

Paramètres de chaque aile avant :

- longueur depuis l'implanture : environ 35 m ;
- corde à l'implanture / au saumon : environ 14 / 7 m ;
- surface : environ 360–400 m².

- **La paire arrière** constitue la surface aérodynamique principale de la navette.

Paramètres de chaque aile arrière :

- longueur depuis l'implanture : environ 100 m ;
- corde à l'implanture / au saumon : environ 14 / 7 m ;
- surface : environ 1 000–1 100 m².

La surface totale des ailes atteint environ 2 800–2 900 m². Le fuselage porteur augmente encore la surface aérodynamique effective de quelque 20 à 30 %.

En subsonique, cette configuration donne une finesse L/D d'environ 9 à 13, suffisante pour un plané stable et un choix contrôlé du point d'amerrissage. Les vitesses typiques de plané et d'amerrissage sont estimées à 90–120 m/s, soit environ 320–430 km/h. À ces vitesses, la sécurité dépend moins de la vitesse horizontale absolue que de la vitesse verticale au contact, de l'incidence et du profil de descente.

4.3.5. Systèmes de parachutes

Pour réduire le choc à l'amerrissage et élargir la fenêtre admissible, la navette dispose d'un système réutilisable de parachutes-ails, employé comme circuit conditionnel de posé en douceur.

- **Architecture et implantation** : deux postes de parachutes-ails sont prévus :

- un dans la **partie supérieure arrière** ;
- un dans la **partie supérieure** avant, juste derrière le nez.

Chaque poste suit une architecture **N+1** — voile principale plus voile de secours — avec conditionnements et extracteurs indépendants. Les voiles ne sont pas attachées en un point **unique, mais par une ligne** transversale reliée aux cadres porteurs, ce qui réduit les pointes locales et stabilise tangage et roulis. Les deux ensembles sont espacés sur l'axe longitudinal afin d'éviter interaction et emmêlement.

- **Surfaces et mode d'emploi** : les parachutes-ails ne portent pas tout le poids ; ils amortissent la vitesse verticale en phase finale et ménagent un contact progressif. Valeurs indicatives :

- surface d'une voile principale : environ **4 500–6 000 m²** ;
- surface active totale des deux voiles : environ **9 000–12 000 m²**.

La vitesse verticale cible au contact est de $-V_z \approx 1 \text{ m/s}$.

- **Critère d'activation** : le système n'est employé qu'en cas de **besoin**. L'**algorithme d'** amerrissage considère l'**accélération totale**, somme vectorielle des composantes aérodynamique, inertielle et hydrodynamique :

- si l'accélération totale prévue au contact ne **dépasse pas 4 g**, la navette amerrit **sur ses ailes sans parachutes** -ails ;
- si elle risque de **dépasser 4 g**, le système s'active, réduit la composante verticale jusqu'à la cible et instaure une descente douce.

- **Réemploi** : **voiles**, suspentes et ancrages supportent de nombreux cycles moyennant inspection, séchage et remplacement des pièces d'usure, sans démontage de la structure porteuse.

4.3.6. Groupe autonome de puissance et de propulsion

La navette possède un système énergétique et propulsif entièrement autonome couvrant toute la mission, des manœuvres orbitales à plusieurs mois de navigation indépendante.

- **Source d'énergie principale** : **réacteur nucléaire embarqué**.

- **Type** : réacteur rapide compact à sels fondus ou réacteur à haute température refroidi au gaz de nouvelle génération ; à terme, module de fusion compact, par exemple à compression de champ selon une architecture comparable à celle d'Helion Energy.
- **Puissance** : 10–20 MW électriques et 50–100 MW thermiques.
- **Fonction** : alimenter tous les systèmes embarqués, les éléments supraconducteurs de lévitation, les **propulseurs électromagnétiques à plasma**, le refroidissement actif et la **propulsion marine autonome**. Le réacteur fonctionne sans rechargement pendant toute la vie de la navette, soit 5 à 10 ans.

- **Système embarqué supraconducteur de lévitation et de stabilisation**. Des modules cryogéniques à supraconducteurs haute température, refroidis par azote ou hydrogène liquide provenant des systèmes de bord, sont intégrés le long du fuselage. Leur champ principal assure lévitation et stabilisation active. Même en cas de perte totale de l'alimentation extérieure du tunnel, l'interaction inductive avec les enroulements passifs formant les « rails » maintient la sustentation par effet de miroir magnétique.

La commande de stabilisation est hiérarchisée :

- 1) **boucle passive**, à l'échelle de la microseconde : le couplage inductif entre supraconducteurs et enroulements du tunnel produit automatiquement une force de rappel à chaque écart, sans électronique ;
- 2) **boucle matérielle**, de la microseconde à la milliseconde : des circuits spécialisés FPGA et ASIC détectent les déséquilibres et commutent les sections selon des algorithmes déterministes ;

- 3) **boucle logicielle**, de la milliseconde à quelques dizaines de millisecondes : le calculateur embarqué, assisté par une IA limitée, répartit les courants entre sections supraconductrices pour compenser les dérives lentes et les déséquilibres locaux, sans exiger de réaction nanoseconde.

Cette architecture réagit aux perturbations en quelques millisecondes, avec une marge de plusieurs ordres de grandeur sur les besoins de stabilité d'une navette de 15 000 tonnes à vitesse hypersonique.

- **Propulseurs principaux : propulseurs électromagnétiques à plasma de forte poussée.**
 - **Principe** : propulseurs magnétoplasmadynamiques ou à plasma à impulsion spécifique variable, de type VASIMR, alimentés par le réacteur embarqué.
 - **Poussée** : jusqu'à 50–100 kN, soit 5–10 tonnes-force, en régime impulsif ; elle suffit aux corrections orbitales, à la désorbitation et aux transferts entre orbites.
 - **Ergol** : réserve de xénon, d'argon ou d'hydrogène liquide, ce dernier servant aussi au refroidissement.
 - **Autonomie** : l'IA embarquée calcule et exécute elle-même les manœuvres de rendez-vous avec les stations orbitales, de déchargement et de retour.
- **Gestion thermique :**
 - **radiateurs déployables** : panneaux à boucle liquide ouverts dans l'espace pour rayonner dans le vide la chaleur excédentaire du réacteur et des équipements ;
 - **accumulateurs thermiques à changement de phase** : éléments critiques placés dans le nez et les points sensibles. Ils absorbent les pointes de plusieurs mégajoules pendant la traversée de l'atmosphère au départ et au retour, puis cèdent lentement cette chaleur par les radiateurs dans l'espace ou au milieu environnant dans l'océan ;
 - **refroidissement actif** : circuit fermé à hélium ou hydrogène liquide pour refroidir d'urgence le bouclier thermique et les éléments critiques en vol.
- **Redondance et sûreté : commandes** du réacteur doublées, circuits de refroidissement indépendants et moyens d'urgence pour dissiper la chaleur. La conception reste sûre dans tous les scénarios, y compris une chute dans l'océan.

4.3.7. Systèmes autonomes d'amerrissage et de navigation maritime

Après l'amerrissage dans la zone prévue de l'Atlantique, la navette devient un navire entièrement autonome. Elle utilise :

- **propulsion marine** : deux propulseurs azimutaux rétractables ou deux hydrojets, très manœuvrables à faible vitesse ;
- **énergie en mer** : le réacteur nucléaire ou de fusion embarqué alimente à faible régime les propulseurs et les systèmes de bord. Son cœur permet plusieurs mois de navigation autonome ;
- **navigation et communications** : navigation satellitaire GPS/GLONASS et inertielle, radars et lidars pour surveiller la surface, plus une liaison robuste par satellites géostationnaires ;
- **freinage final** : juste avant le contact, la vitesse résiduelle de 100–150 km/h est réduite par un petit parachute de freinage, qui **stabilise et amorce la** décélération, puis par une brève impulsion des **propulseurs principaux à plasma pour régler** précisément la vitesse verticale. Le **parachute est largué après l'amerrissage** ;

Grâce à cette configuration, la navette **rejoint seule son port** d'attache ou un remorqueur sans assistance immédiate. Elle **tient la mer par gros temps**, effectue de longues traversées et gagne le dock prévu pour l'entretien : le véhicule spatial devient **alors un navire** robotisé.

4.3.8. AstroLiner-S : version initiale simplifiée

Aux premières étapes de StarRoad, une version initiale de la navette, AstroLiner-S — pour Simplified / Start — fournit une configuration de base techniquement simplifiée et plus prudente en exploitation.

Cette variante reste pleinement fonctionnelle, mais simplifie l'énergie et les systèmes. Elle est destinée à la mise en service initiale, aux premiers lancements de fret et d'équipages, ainsi qu'à une réduction progressive des risques techniques, opérationnels et réglementaires.

- **Principe d' AstroLiner -S** : reprendre le paradigme fondamental de StarRoad — traverser l'atmosphère par inertie — **sans source nucléaire ou de fusion à bord, tout en conservant exactement** les dimensions et la masse de lancement de la version principale .

Toutes les opérations exigeant une puissance extrême — accélération, lévitation et stabilisation dans le tunnel — sont entièrement prises en charge par l'infrastructure au sol.

AstroLiner-S est :

- un véhicule de transport autonome ;
- entièrement réutilisable ;
- capable d'atteindre l'orbite, de la quitter et de revenir par ses propres moyens ;
- propulsé exclusivement par des moteurs chimiques hors du tunnel ;
- dépourvu de toute source embarquée de rayonnement ionisant de forte puissance.

- **Énergie et supraconducteurs : la configuration** AstroLiner-S supprime entièrement :

- les groupes nucléaires et de fusion ;
- les risques radiologiques, thermiques et accidentels qui leur sont associés ;
- les scénarios de contamination irréversible du tunnel et des sections du portail.

Les éléments supraconducteurs de lévitation, de stabilisation et d'interaction avec la voie :

- sont préchargés en courant avant le départ ;
- sont placés en régime persistant ;
- sont isolés les uns des autres et commandés à bord.

Des batteries et des accumulateurs inertiels à volant alimentent l'électronique, la commande et les protections pendant tout le cycle d'accélération dans le tunnel, avec une marge temporelle.

Pendant l'accélération, la commande active des boucles supraconductrices se limite à de faibles courants correctifs et aux modes d'urgence ; aucune source continue de forte puissance n'est donc nécessaire à bord.

En orbite, des panneaux solaires repliables constituent la source active d'électricité.

- **Propulsion hors du tunnel**

Toutes les opérations orbitales d'AstroLiner-S utilisent une propulsion chimique.

La navette reçoit :

- des moteurs chimiques principaux de poussée moyenne, de type LOX/LH₂ ou LOX/LCH₄ ;
- des systèmes redondants de contrôle d'attitude et d'urgence (RCS).

La propulsion permet :

- d'achever l'insertion sur l'orbite visée après la sortie de l'atmosphère ;
- de corriger les paramètres orbitaux ;
- de se désorbiter ;
- d'effectuer une rentrée contrôlée et de revenir.

L'absence de propulsion électrique et magnétoplasmique dans cette version découle de l'absence d'une source électrique embarquée de forte puissance ; elle ne constitue pas une limite de l'architecture StarRoad dans son ensemble.

- **Retour et réemploi**

AstroLiner-S peut :

- se désorbiter de façon autonome ;
- effectuer une rentrée atmosphérique contrôlée à faible pente ;

- planer aérodynamiquement ;
- amerrir au moyen de ses ailes et du système de parachutes-ailes.

L'absence de réacteur simplifie fortement :

- l'exploitation maritime ;
- l'entretien courant ;
- la remise en état après un amerrissage imprévu.

○ **Rôle d'AstroLiner-S dans le développement de StarRoad**

AstroLiner-S est envisagé comme :

- la première version produite en série de la navette StarRoad ;
- une plate-forme permettant d'accumuler des données sur les lancements et les défaillances ;
- un moyen de mettre le système en service plus tôt ;
- le transport de base de la première infrastructure orbitale.

Avec l'avancement du projet, l'apparition de sources compactes de forte puissance et l'expérience d'exploitation, AstroLiner-S pourra être progressivement complété ou remplacé par l'AstroLiner intégral, doté de groupes de puissance embarqués et de propulseurs électromagnétiques à plasma.

AstroLiner-S n'est donc pas un compromis, mais un premier échelon logique : il permet d'exploiter StarRoad plus tôt, plus sûrement et avec moins de risques systémiques sans modifier l'architecture fondamentale de la ligne.

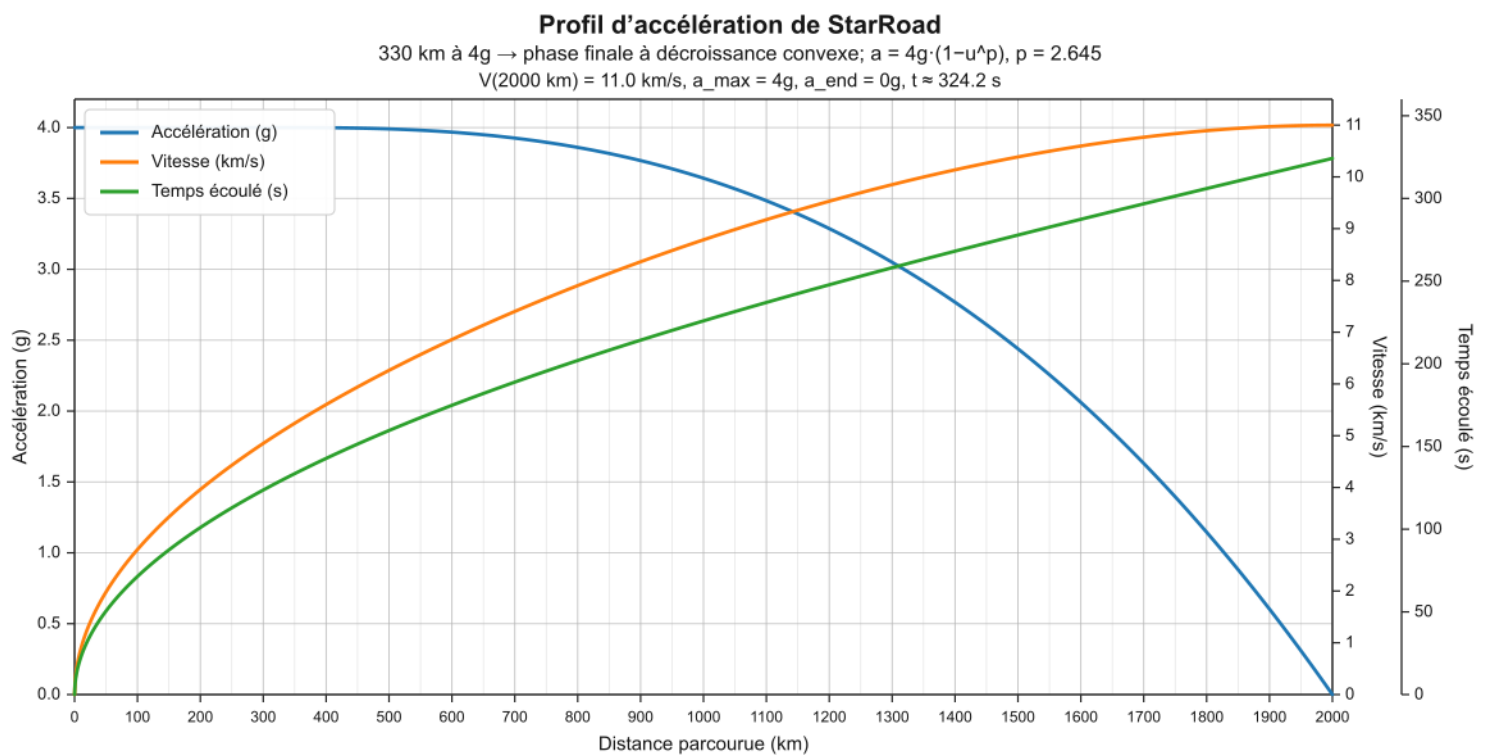
5. Cycle d'exploitation, de la préparation au départ à la maintenance après amerrissage

5.1. Préparation et départ

La navette chargée est placée dans la chambre de lancement près de Batanga. Ses systèmes embarqués sont testés, puis ceux de l'accélérateur. Vient ensuite l'essai avant lancement du portail gazodynamique. Les supraconducteurs embarqués sont mis sous courant, la sustentation magnétique est démarrée et contrôlée, et le tunnel est mis sous vide. Sur ordre, l'alimentation impulsionnelle des premiers segments de l'accélérateur commence.

5.2. Accélération dans le tunnel

- **0–330 km. Accélération** longitudinale initiale d'environ 4g. Une part importante de l'énergie sert à la sustentation et à vaincre la gravité.
- **330–environ 1 800 km, partie descendante de la courbe** en S. L'accélération longitudinale diminue progressivement de 4g à zéro. La navette suit les courbes souterraines avec des charges allant jusqu'à environ 4g, tandis que les éléments électromagnétiques périphériques stabilisent sa trajectoire.
- **Environ 1 800–2 050 km, partie ascendante de la courbe** en S. L'accélération tombe à zéro à l'approche du portail. La navette parcourt les 50 derniers kilomètres par inertie à environ 11 km/s.



5.3. Sortie par le portail atmosphérique

- Grâce à l'altitude du point de départ, la navette se trouve déjà à plus de 10 km au-dessus du niveau de la mer à environ 30 km du portail, ce qui minimise l'effet de l'onde de choc au sol. Les couronnes propulsives du portail sont testées une minute avant le lancement de la navette, sans ouvrir l'obturateur mécanique. Après que la navette a parcouru 45 % du tunnel, l'air comprimé accumulé par les pompes lors de la mise sous vide de la dernière section est libéré à travers les couronnes sous forme d'un flux supersonique. Environ 10 secondes avant le passage, l'hydrogène est injecté et la barrière gazodynamique entre dans son régime principal de combustion, produisant un écoulement supersonique conique, stable, chaud et partiellement ionisé. Trois secondes après l'activation réussie des couronnes et la formation du cône chaud de barrière et de gradient, l'obturateur mécanique s'ouvre.
- La barrière empêche également la dégradation du vide dans le tunnel et atténue le choc thermique initial. En quelques millisecondes, la navette traverse la zone préparée de gaz raréfié et chauffé. Cette technologie essentielle modifie la répartition temporelle de la première sollicitation aérodynamique et supprime le front de choc ultrabref provoqué par le changement de milieu.
- La barrière gazodynamique ne réduit pas la somme des forces aérodynamiques : elle fait passer la surcharge de choc du domaine des microsecondes à celui des millisecondes, ce qui réduit de façon décisive les contraintes locales, les vibrations et le choc thermique dans la structure.
- L'obturateur mécanique s'ouvre immédiatement après le passage de la navette, puis les couronnes de réacteurs sont coupées sans délai.

5.4. Traversée de l'atmosphère

Sur une trajectoire balistique, la navette utilise sa masse inertielle et sa structure robuste pour traverser les couches denses de l'atmosphère. Les pointes de charge thermique et dynamique se produisent durant les 10 à 20 premières secondes.

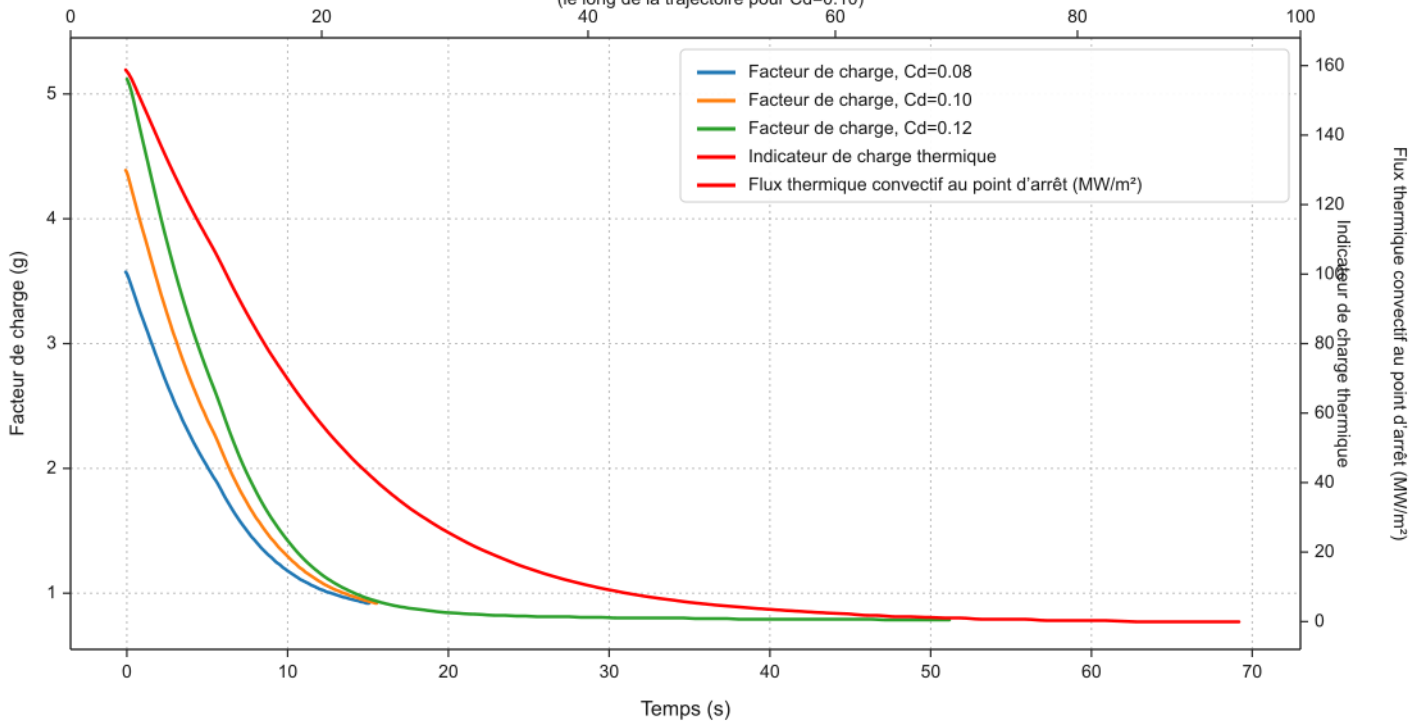
- **Précision essentielle.** À la sortie de la barrière gazodynamique, la navette interagit immédiatement avec l'atmosphère normale à l'altitude prévue, environ 3 400 m. Tous les calculs de trajectoire, de flux thermique et de surcharge reposent sur une interaction aérodynamique complète avec l'atmosphère, sans supposer l'existence d'un « bouclier gazeux », d'un « canal » ni d'un volume raréfié accompagnant le véhicule.

StarRoad : charges mécaniques et thermiques selon le temps et l'altitude

$C_d = 0.08, 0.10, 0.12$ (C_d est le coefficient de traînée aérodynamique)

Altitude au-dessus du niveau de la mer (km)

(le long de la trajectoire pour $C_d=0.10$)



5.5. Arrivée dans l'espace et opérations orbitales

Après la sortie de l'atmosphère, les radiateurs se déploient pour rejeter la chaleur. La navette active ensuite ses propulseurs électromagnétiques à plasma pour corriger finement la trajectoire et rejoindre l'orbite visée, souvent directement au-delà de l'orbite géostationnaire ou vers un point de Lagrange. La charge utile est alors déployée. Dans la configuration AstroLiner-S, l'insertion finale et les corrections orbitales sont assurées par la propulsion chimique.

5.6. Désorbition et retour

La version complète d'AstroLiner emploie ses moteurs électromagnétiques à plasma pour se désorbiter. Dans AstroLiner-S, le système chimique réalise le freinage de désorbition, les corrections et les manœuvres finales.

5.7. Amerrissage

Au-dessus de l'Atlantique, près du Gabon, le système de parachutes de freinage est déployé pour réduire la vitesse. La navette amerrit sous un faible angle d'attaque sur son dessous renforcé, conçu pour le contact d'une surface chauffée avec l'eau froide. Les hélices ou hydrojets se déploient après l'amerrissage.

5.8. Remorquage et maintenance

Les propulseurs propres de la navette, alimentés par le réacteur embarqué, l'amènent au complexe portuaire ; en cas de défaillance, des remorqueurs d'astreinte prennent le relais. Le port assure l'inspection, l'entretien, la réparation de la protection thermique et la préparation du voyage suivant. AstroLiner-S revient au port au moyen de batteries, d'une unité auxiliaire de puissance ou de remorqueurs d'astreinte.

6. Réalisation, calendrier, exigences et centres industriels

6.1. Phases du projet

La mise en œuvre de StarRoad est organisée en une suite d'étapes liées sur le plan technologique et justifiées sur le plan économique. Chaque phase possède des objectifs et des critères de réussite précis et construit l'infrastructure nécessaire à la suivante, afin de réduire les risques techniques et financiers.

6.1.1. Phase 0 : conception et essais (2 à 5 ans)

- **Objectif** : valider les principes physiques, mettre au point les technologies critiques en laboratoire et constituer la base d'ingénierie.
- **Actions principales**
 1. Modélisation mathématique et CFD détaillée de tous les phénomènes : accélération, fonctionnement du portail et choc aérodynamique.
 2. Constitution d'un consortium international et conclusion d'accords politiques et juridiques préliminaires.
 3. Reconnaissances géologiques et environnementales sur l'ensemble du tracé.
 4. Création de sites d'essai hors de l'implantation principale :
 - essais sur banc des modules de sustentation supraconductrice et des alimentations électriques impulsionnelles ;
 - construction et essai d'un prototype au 1:10 du portail gazodynamique afin de confirmer la possibilité de créer une barrière à gradient stable ;
 - Creusement d'un court tunnel démonstrateur sous vide de 1 à 2 km pour valider l'intégration du vide, de l'accélération magnétique de corps d'essai légers et des systèmes de sécurité.
- **Critère de réussite** : données expérimentales confirmant la viabilité des solutions essentielles — portail, lévitation et stabilisation — et achèvement de l'avant-projet détaillé de la phase 1.

6.1.2. Phase 1 : socle d'infrastructure et d'énergie (5 à 7 ans)

- **Objectif** : créer la « colonne vertébrale énergétique » et mettre au point la construction robotisée en conditions réelles.
- **Actions principales**
 1. Mise en place d'une petite série de tunneliers robotisés standardisés de 2 mètres de diamètre.
 2. Creusement parallèle de la première paire de collecteurs principaux du système géothermique autonome sur les quelque 2 050 km du tracé afin d'établir le circuit initial de stabilisation thermique.
 3. Construction, aux points clés du tracé, des premières centrales géothermiques utilisant du CO₂ supercritique issu de la capture directe dans l'air (DAC).
 4. Creusement au-dessus des collecteurs d'un tunnel prototype de petit diamètre — D = 2 m, L = 2 050 km — doté de systèmes élémentaires de vide, de communication et de maintenance.
- **Critère de réussite** : la configuration minimale du système géothermique est entièrement opérationnelle et autonome en énergie ; le creusement robotisé à grande vitesse est maîtrisé et fournit la base des extensions ultérieures.

6.1.3. Phase 2 : validation à petite échelle (statut de « complexe scientifique et instrumental ») (4 à 6 ans)

- **Objectif** : vérifier la synchronisation et la sécurité des systèmes à des vitesses réalistes et recueillir des données expérimentales inédites.
- **Actions principales**
 1. Dans le petit tunnel d'essai, accélérer et freiner des corps inertes pesant jusqu'à plusieurs tonnes à des vitesses de 1 à 11 km/s.
 2. Essais complets d'un prototype de portail gazodynamique à l'échelle 1:5 avec passage d'une petite navette expérimentale.
 3. Vérification expérimentale de l'hypothèse du « béliet inertiel » : lancement de masses d'essai de structures et de protections thermiques différentes afin de mesurer les accélérations et les flux thermiques.
 4. Début de la conception détaillée et de la fabrication des prototypes des systèmes essentiels de la navette grandeur réelle, notamment les aimants supraconducteurs et les accumulateurs thermiques.

- **Critère de réussite** : tous les systèmes de synchronisation fonctionnent de manière stable et sûre ; l'efficacité du portail gazodynamique est confirmée ; l'expérience démontre que les charges spécifiques diminuent lorsque la masse augmente ; l'avant-projet de la navette est achevé.

6.1.4. Phase 3 : section pleinement fonctionnelle et prototype de navette (4 à 7 ans)

- **Objectif** : intégrer et tester les systèmes dans leur configuration finale sur une section importante et réaliser un prototype apte au vol.
- **Actions principales**
 1. Construction d'une section pleinement fonctionnelle de 50 à 200 km du tunnel principal, à la section finale de $17,5 \times 12,5$ m, avec tous les enroulements, les stockages d'énergie et le tunnel de service.
 2. Extension du système géothermique sous cette section jusqu'à sa configuration complète à sept galeries.
 3. Fabrication et essais au sol approfondis d'un prototype de navette grandeur réelle dépourvu de propulsion : systèmes cryogéniques, résistance de la structure et protection thermique.
 4. Essais intégrés dans le tunnel : accélération et freinage de masses représentatives de la navette jusqu'à 8 g et ~ 4 km/s ; validation de tous les protocoles d'urgence Alarm 1–3.
 5. Développement, essais au sol et certification d'un réacteur nucléaire compact embarqué pour la version entièrement fonctionnelle de l'AstroLiner.
- **Critère de réussite** : plusieurs cycles d'accélération et d'arrêt d'urgence sont accomplis sans dommage critique ; l'efficacité de la récupération d'énergie est confirmée ; la navette de vol et le réacteur sont prêts pour l'intégration finale.

6.1.5. Phase 4 : prolongement et mise en service (10 à 15 ans)

- **Objectif** : achever la première ligne, intégrer la navette et atteindre la vitesse d'exploitation.
- **Actions principales**
 1. Allongement progressif du tunnel accélérateur jusqu'à sa longueur nominale de 2 050 km grâce au travail parallèle de nombreux tunneliers.
 2. Déploiement de l'infrastructure géothermique et des accumulateurs impulsionsnels sur toute la longueur.
 3. Construction du complexe définitif du portail atmosphérique de haute altitude sur le mont Mohi.
 4. Intégration des systèmes embarqués de la navette, puis essais au sol et essais à faible vitesse dans le tunnel.
 5. Lancements progressifs, avec augmentation graduelle de la vitesse et de la masse jusqu'aux valeurs nominales de 15 000 t et ~ 11 km/s.
- **Critère de réussite** : le premier lancement hypersonique réussi de la navette place une charge utile sur l'orbite visée ; la cadence nominale d'un à deux lancements par mois est atteinte.

6.1.6. Phase 5 : extension et exploitation industrielle (en continu)

- **Objectif** : transformer StarRoad en une infrastructure mondiale en croissance continue.
- **Actions principales**
 1. Exploitation de la première ligne et mise au point des cycles logistiques : chargement, maintenance et retour.
 2. Début de la construction d'une deuxième ligne puis d'autres lignes parallèles afin d'accroître le débit de fret.
 3. Déploiement de chantiers navals orbitaux et d'installations de transformation à partir des centres industriels du projet.
 4. Développement d'un réseau d'embranchements : des accélérateurs plus courts destinés aux personnes et aux cargaisons particulières.

- **Critère de réussite** : le coût de livraison descend sous 10 \$/kg ; les lancements deviennent quotidiens ; un plan approuvé existe pour les prochaines lignes principales et leur construction a commencé.

6.2. Centres industriels

- **Complexe côtier, à l'embouchure de la Nyanga au Gabon** : construction des navettes, production des modules des premières sections du tunnel et principal port d'attache et d'entretien des navettes.
- **Complexe d'altitude, au mont Mohi et sur le plateau méridional en République démocratique du Congo** : production des modules des sections rapides et de la courbe en S finale, montage et entretien du mécanisme du portail. Le site comporte trois voies indépendantes d'électrolyse et de stockage de l'hydrogène ; même en situation d'urgence, chacune peut alimenter les trois couronnes motrices de la barrière gazodynamique. L'électrolyse est alimentée par les sources locales — géothermie autonome, hydraulique, solaire et nucléaire — intégrées au réseau du projet.

6.3. Calendrier général

Le projet exige de nombreuses technologies et solutions avancées mais réalisables dès aujourd'hui, ainsi que le travail parallèle de nombreux tunneliers, le déploiement des infrastructures et deux centres de production. La première ligne devrait donc demander environ 25 à 40 ans entre le début de la phase 0 et le premier lancement commercial de la phase 4. Ce délai est comparable à celui d'autres projets de mégascience, comme ITER et LIGO. Dans ces conditions, la cadence dépend avant tout du financement et des accords diplomatiques et juridiques, non de la faisabilité technique fondamentale. L'objectif est ambitieux, mais accessible à un consortium mondial.

7. Problèmes et missions traités

7.1. Surchauffe mondiale

Transférer les industries énergivores dans l'espace afin de réduire la pollution thermique et la pression sur la biosphère terrestre.

7.2. Mission économique

Réduire radicalement le coût d'accès à l'espace afin de rendre économiquement exploitables l'énergie solaire, les astéroïdes, les ressources lunaires et, à terme, les ressources planétaires.

7.3. Objectif stratégique

Créer un système de transport vers l'orbite résilient et indépendant de la météo, capable de soutenir à la fois l'industrialisation orbitale et la défense planétaire.

7.4. Catalyseur technologique

Le projet stimulera les progrès dans les domaines de la puissance pulsée, de la supraconductivité, de l'hypersonique, de la propulsion nucléaire et du creusement robotisé des tunnels.

7.5. Autonomie énergétique et thermique

Le système géothermique répond aux deux besoins. Il fournit jusqu'à environ 15 GW de puissance électrique continue, couvre entièrement l'accélérateur et crée un excédent commercial, tout en maintenant un environnement froid prévisible autour du tunnel principal. La construction et l'exploitation deviennent possibles dans des couches profondes et géothermiquement actives, sans dépendre d'une génération extérieure vulnérable ni d'un climat imprévisible.

7.6. Empreinte carbone

StarRoad adopte un modèle de contribution environnementale active. Le projet devient le plus grand consommateur fixe de CO₂ atmosphérique au monde : sous forme supercritique, ce gaz reste en permanence le fluide de travail du circuit géothermique fermé. Des millions de tonnes sont retirées du cycle atmosphérique et enfermées dans le circuit industriel pendant des siècles. StarRoad devient ainsi un puissant outil d'ingénierie climatique capable de compenser les émissions carbonées de secteurs industriels entiers.

7.7. Potentiel social et environnemental du canal magistral hydrothermal

Le canal magistral hydrothermal n'est pas seulement un élément du refroidissement géothermique ; c'est aussi une infrastructure transcontinentale à double usage qui profite à la région :

- **irrigation** : des vannes de dérivation rendent l'eau disponible pour les terres agricoles voisines et contribuent à former une « ceinture verte » africaine dans les zones sèches ;
- **alimentation naturelle** : les pluies équatoriales fréquentes remplissent automatiquement le canal ;
- **Traitement thermique de l'eau**. Portée à +60 °C par les échangeurs géothermiques, elle est pratiquement pasteurisée et convient à l'irrigation sûre, à l'industrie et, après filtration, aux usages domestiques et à l'eau potable.
- **écoulement gravitaire** : la pente naturelle, de 3 400 m à l'est à 0 m à l'ouest, fait circuler l'eau sans pompage et assure ainsi une circulation sans dépense d'énergie ;
- **microcentrales** hydroélectriques : le dénivelé du canal permet une cascade de petites centrales fournissant une énergie renouvelable supplémentaire aux réseaux locaux et au système lui-même.

StarRoad devient ainsi une plate-forme non seulement de transport, mais aussi agroénergétique, intégrée au développement durable régional.

7.8. Réseau énergétique

Le système géothermique autonome et son réseau de centrales fournissent un excédent d'énergie « verte » à l'accélérateur, mais aussi aux villes, industries et exploitations agricoles proches.

7.9. StarRoad comme artère économique

StarRoad comme artère économique. D'un côté, StarRoad devient un portail planétaire de fret pour la mise en valeur du Système solaire ; de l'autre, il devient la principale artère économique de l'Afrique et un catalyseur de l'industrialisation, de l'indépendance énergétique et de la sécurité alimentaire. Le tracé n'est pas un ouvrage isolé qui s'enfonce sous terre pour ne mener nulle part. Ses infrastructures de surface — 40 terminaux, deux pôles industriels au Gabon et en République démocratique du Congo, un canal hydrothermal structurant et un réseau routier — forment un ensemble linéaire de développement durable qui traverse l'Afrique centrale d'ouest en est. Sur les 2 050 km du tracé, un paysage unique, alternant zones écologiques, technologiques et agricoles, voit le jour. Cet ensemble linéaire devient une zone économique autosuffisante où :

- l'énergie provient de la géothermie, de la petite hydroélectricité et du solaire ;
- les cultures alimentaires reposent sur une agriculture irriguée ;
- des biens industriels sont fabriqués, notamment des composants de navettes, des modules de tunnel et des équipements ;
- le fret circule par la route et le rail ;
- un port spatial comprenant le complexe de lancement et le portail atmosphérique est exploité ;
- le CO₂ atmosphérique est capté dans des installations de captage direct dans l'air.

7.10. Sécurité des infrastructures critiques

Le projet prévoit dès l'origine des mesures pour manipuler sans danger de grandes quantités d'hydrogène, des vitesses hypersoniques et des énergies de l'ordre du gigawatt. Protection passive, surveillance active et réaction automatique forment une nouvelle norme pour les grandes installations énergétiques et les systèmes à hydrogène.

7.11. Choix du site et possibilité d'extension

Le site du portail doit satisfaire des dizaines d'exigences parfois contradictoires : altitude, logistique, sécurité, extension et droit. Le mont Mohi et le plateau voisin permettent de commencer par un site d'altitude compact, puis de devenir le plus grand port spatial du monde sans déménager.

7.12. Coordination politique et juridique d'un projet transcontinental

Le passage du tracé à travers trois pays est traité par un consortium international inspiré de grands projets comme le CERN et ITER. Les infrastructures souterraines et les actifs énergétiques du système géothermique autonome d'énergie thermique bénéficient d'un statut juridique particulier, et les avantages sont clairement répartis entre les participants. Le projet n'est pas un fardeau supposant une stabilité politique préalable : grâce à l'interdépendance, à un accès privilégié à l'avenir et aux technologies mises au point pendant la construction, il devient en lui-même un instrument précieux de création et de maintien de la stabilité.

7.13. Croissance progressive du flux de fret

La fréquence des lancements augmente avec l'industrie orbitale. Une phase pionnière de 1 lancement par mois crée les chantiers orbitaux ; une phase industrielle de 1 à 3 lancements par semaine construit les actifs ; une phase de maturité avec des lancements quotidiens entretient la croissance exponentielle de l'économie spatiale.

8. Marchés et logistique orbitale

Cette section répond à la question centrale de la viabilité économique de StarRoad : que faut-il lancer en volumes suffisants pour exploiter pleinement un corridor de lancement super lourd ? StarRoad ne doit pas être considéré comme un système réservé à quelques missions exceptionnelles. Il vise un flux de fret massif, régulier et industrialisé entre la Terre et les orbites hautes.

Le principal marché initial de StarRoad n'est ni celui des constellations de satellites en orbite terrestre basse, ni celui des engins scientifiques isolés, mais celui de l'énergie orbitale à grande échelle, des infrastructures informatiques, de la logistique interorbitale, des habitats orbitaux, des chantiers spatiaux et, à terme, des industries extraterrestres.

8.1. Le problème de la demande pour les lancements super lourds

L'économie des fusées classiques est limitée non seulement par le coût au kilogramme, mais aussi par la nature même du lancement : les fusées livrent le fret par petits lots distincts, avec une forte proportion de masse auxiliaire, un assemblage orbital complexe et de nombreuses opérations séparées. Même lorsque les prix baissent, le transport par fusée reste donc une logistique de type expéditionnaire.

StarRoad crée un marché d'une autre nature. Il ne s'agit pas seulement de lancer à moindre coût les charges utiles actuelles, mais de rendre possibles des charges qui ne pourront jamais devenir rentables avec une logistique fondée sur les fusées.

Ces charges comprennent :

- des centrales solaires spatiales de l'ordre du gigawatt, complètes ou presque complètes ;
- de grands centres de données orbitaux ;
- des modules de transmission d'énergie par micro-ondes ;
- de grandes poutres en treillis, des radiateurs, des miroirs et des panneaux ;
- des chantiers spatiaux et des chaînes d'assemblage automatisées ;
- des modules résidentiels et industriels pour EML4/5 ;
- des remorqueurs et des transports interorbitaux ;
- des modules d'ergols, d'énergie et de service ;
- des éléments des futures infrastructures astéroïdales et interplanétaires.

StarRoad ne dépend donc pas du marché actuel des lancements spatiaux. Il crée un nouveau marché, comme les chemins de fer, le transport conteneurisé et les réseaux électriques ne se sont pas contentés de répondre à une demande existante, mais ont fait naître de nouvelles économies autour d'eux.

8.2. Marché initial : énergie solaire spatiale et centres de données orbitaux

Au premier stade, le principal fret commercial et stratégique de StarRoad devrait être constitué de centrales solaires spatiales de l’ordre du gigawatt. Ces grandes plateformes énergétiques, auto-déployables ou partiellement auto-déployables, sont livrées directement par AstroLiner-S sur leur orbite ou leur lieu d’exploitation.

Les centrales solaires spatiales répondent simultanément à plusieurs besoins :

- elles créent une demande massive et récurrente de lancements super lourds ;
- elles forment un marché de l’énergie indépendant du cycle jour-nuit et de la plupart des conditions météorologiques ;
- elles permettent d’installer hors de la surface terrestre une part importante des nouvelles capacités de production ;
- elles fournissent la base énergétique de l’industrie orbitale ;
- elles justifient économiquement la création d’une logistique orbitale, de chantiers spatiaux et d’habitats de service.

La constante solaire au niveau de l’orbite terrestre est d’environ 1 361,6 W/m². Un gigawatt de rayonnement incident correspond donc à quelque 0,74 km² de capteurs parfaitement orientés. Avec un rendement photovoltaïque de 25–35 %, les pertes de conversion et de transmission, les espacements structurels, les radiateurs, l’électronique de puissance, la redondance et la dégradation, la surface réelle de capteurs nécessaire pour produire 1 GW d’électricité utile atteint plusieurs kilomètres carrés. Cette superficie est considérable selon les normes des engins spatiaux classiques, mais naturelle pour StarRoad, où la masse, la surface et les dimensions structurelles cessent d’être les contraintes principales.

8.2.1. Repères de masse pour les centrales solaires spatiales de l’ordre du gigawatt

Une centrale de l’ordre du gigawatt n’est pas un petit satellite. Même les architectures contemporaines les plus optimistes attribuent plusieurs milliers de tonnes à une centrale de 2 GW. Les concepts les plus légers, comme CASSIOPeiA, sont estimés à environ 2 000 t, tandis que des études plus prudentes de la NASA donnent 5 900–10 000 t pour un système équivalent de 2 GW.

Projet / étude	Puissance	Masse	Pertinence pour StarRoad
CASSIOPeiA / Space Energy Initiative / Frazer-Nash	jusqu’à 2 GW fournis au réseau	≈2 000 t	La référence la plus pertinente pour StarRoad : GEO/GSO, facteur de production de 99,7 %, architecture associant 1 satellite à 1 antenne rectificatrice (rectenna) et, dans le meilleur des cas, puissance massique proche de 1 MW/t.
NASA 2024 RD1 / Innovative Heliostat Swarm	2 GW fournis au réseau	≈5 900 t	Une estimation plus prudente. La NASA normalise le système à 2 GW fournis au réseau ; RD1 comporte environ 11,5 km² de panneaux solaires.
NASA 2024 RD2 / Mature Planar Array	2 GW fournis au réseau, mais au moyen de plusieurs systèmes	≈10 000 t	La NASA indique une masse d’environ 10 millions de kg et une surface de panneaux solaires d’environ 19 km². Comme RD2 produit pendant moins longtemps, cinq systèmes RD2 sont nécessaires pour obtenir à peu près la même énergie qu’un seul RD1.
JAXA / Sasaki Tethered-SPS	0,75 GW en moyenne / 1,2 GW au maximum	≈20 000 t par système	Une référence lourde. Une extrapolation sommaire à une puissance moyenne de 2 GW donne environ 50 000 t ou davantage : il faut donc une série de vols et un assemblage orbital, plutôt qu’un seul lancement.
Caltech SSPP / tuile modulaire légère	non pas une centrale complète de 2 GW, mais une unité technologique	pour 2 GW fournis au sol, la seule couche active représenterait théoriquement ≈1 700–3 400 t	Avec 160 g/m² et un rendement de bout en bout de 7–14 %, cette estimation ne couvre que la couche active. Une centrale complète exige aussi une structure, un système de transmission d’énergie, un contrôle d’attitude, des radiateurs, des câbles, de l’électronique, des moyens de maintenance et des réserves.

Le tableau mène à une conclusion essentielle : une **centrale solaire spatiale de 2 GW pesant 2 000–10 000 t correspond presque exactement au** créneau d’AstroLiner. Pour StarRoad, elle représente un lancement super lourd ou un petit nombre de vols avec un assemblage orbital minimal. La logistique par fusées exigerait des dizaines ou des centaines de lancements de fusées super lourdes, des chaînes de ravitaillement, un assemblage en orbite, un remorquage vers GEO ou EML et une hausse brutale de la complexité opérationnelle.

8.2.2. Production énergétique d'une centrale solaire spatiale de 2 GW

Avec les hypothèses de référence suivantes :

- puissance fournie au réseau : **2 GW** ;
- disponibilité / facteur de production : **99,7 %** ;
- durée de vie nominale : **30 ans** ;

une centrale produit :

- **≈17,47 TWh par an** ;
- **≈524 TWh** en 30 ans.

Le coût de transport au kilogramme devient alors un facteur fondamental. Dans la logistique par fusées, le lancement reste le principal obstacle. Avec StarRoad, la part du transport diminue rapidement jusqu'à ne représenter qu'une faible fraction du prix futur de l'énergie.

8.2.3. Part du transport dans le coût de l'énergie solaire spatiale

Le calcul ci-dessous ne porte **que sur la part transport du coût** actualisé de l'énergie : le coût de livraison de la masse de la centrale, divisé par l'énergie produite pendant ses 30 années de fonctionnement. Il exclut la fabrication de la centrale, la rectenna, la maintenance, l'assurance, le remplacement des modules, l'infrastructure au sol et la marge de l'exploitant.

Formule :

Part transport du LCOE = masse de la centrale × coût de livraison / production énergétique sur la durée de vie

Pour une centrale de 2 GW disponible à 99,7 % pendant 30 ans, la production totale est d'environ 524 **milliards de kWh**.

Étape / système de transport	Coût de livraison	Centrale de type CASSIOPeIA, 2 000 t, ¢/kWh	NASA RD1, 5 900 t, ¢/kWh	NASA RD2, 10 000 t, ¢/kWh
Logistique actuelle par fusées, référence basse vers GTO	3 600–5 600 \$/kg	1,37–2,14	4,05–6,31	6,87–10,69
StarRoad, années 1–2	80–120 \$/kg	0,0305–0,0458	0,0901–0,1351	0,1527–0,2290
StarRoad, années 3–5	30–50 \$/kg	0,0114–0,0191	0,0338–0,0563	0,0572–0,0954
StarRoad, années 6–10	10–20 \$/kg	0,0038–0,0076	0,0113–0,0225	0,0191–0,0382
StarRoad, années 11–15	3–8 \$/kg	0,0011–0,0031	0,0034–0,0090	0,0057–0,0153
StarRoad, années 16–25	0,8–3 \$/kg	0,0003–0,0011	0,0009–0,0034	0,0015–0,0057
StarRoad, à partir de la 26e année	0,3–1 \$/kg	0,0001–0,0004	0,0003–0,0011	0,0006–0,0019

À titre de comparaison, le LCOE des nouvelles installations terrestres modernes est de plusieurs centimes par kWh : environ 3–4 ¢/kWh pour l'éolien terrestre, 4–5 ¢/kWh pour le solaire photovoltaïque à grande échelle et 5–6 ¢/kWh pour l'hydroélectricité. Selon les estimations de la NASA, les solutions terrestres de remplacement se situeraient autour de 2–5 ¢/kWh en 2050.

Une conclusion importante s'impose : même pendant la période pilote, la part transport de l'énergie solaire spatiale avec StarRoad est inférieure d'un ordre de grandeur au LCOE de la production terrestre ; aux stades de maturité, elle disparaît presque en tant que facteur de prix majeur. Cela ne signifie pas que le coût total de l'énergie solaire spatiale sera de quelques millièmes de centime. Il reste la fabrication de la centrale et de la rectenna, l'entretien, l'électronique, les radiateurs, le remplacement des modules, l'assurance et la marge d'exploitation. Cela signifie que StarRoad supprime l'obstacle précis qui rend l'énergie solaire spatiale économiquement pénalisante avec une logistique par fusées.

Dans les scénarios actuels fondés sur les fusées, le bilan réel est pire que le simple chiffre de 3 600–5 600 \$/kg. Une grande centrale doit non seulement être mise en orbite, mais aussi rejoindre son lieu d'exploitation, être assemblée et entretenue ; il faut en outre ravitailler les remorqueurs et maintenir les infrastructures. La NASA estime ainsi un **LCOE de référence** d'environ 61 ¢/kWh pour RD1 et 159 ¢/kWh pour RD2, très au-dessus des solutions terrestres. StarRoad ne fait pas que réduire le coût du lancement : il change la nature du problème en remplaçant des milliers d'opérations de fusées par un ou quelques vols d'infrastructure super lourds.

8.2.4. Les centres de données orbitaux comme deuxième marché initial

Les centres de données orbitaux pourraient constituer le deuxième marché initial. L'essor de l'intelligence artificielle, de l'informatique en nuage et des infrastructures numériques fait des centres de données une composante importante de la demande mondiale d'énergie. Selon l'AIE, ils consomment déjà plusieurs centaines de TWh par an et pourraient approcher 1 000 TWh annuels au cours de la prochaine décennie.

Installer une partie des infrastructures informatiques à proximité de centrales solaires spatiales offre plusieurs avantages :

- un accès direct à une production orbitale continue ;
- une moindre sollicitation des réseaux électriques terrestres ;
- la possibilité de construire de vastes champs de radiateurs dans le vide ;
- une dépendance réduite à l'égard des contraintes locales de terrain, d'eau et de capacité du réseau ;
- le partage des infrastructures énergétiques, de communication et de maintenance avec les centrales solaires.

Au stade initial, les centrales orbitales et les centres de données peuvent être lancés comme plateformes distinctes ou comme complexes intégrés associant énergie et calcul : centrale solaire, électronique de puissance, radiateurs, module informatique, antennes de communication et chaîne de transmission par micro-ondes.

8.3. Logique climatique et industrielle du solaire spatial

Les centrales solaires spatiales ne doivent pas être présentées comme une simple technologie « verte ». Leur portée est plus large : elles remplacent la production carbonée non par une baisse du confort et des limites forcées à la consommation, mais par un système énergétique plus puissant.

La politique climatique classique est souvent perçue comme une demande de sacrifier du confort pour réduire les émissions. StarRoad propose une autre voie : ne pas réduire la capacité de la civilisation, mais transférer dans l'espace l'essentiel des nouvelles capacités et accroître l'énergie disponible sans augmenter l'empreinte carbone du secteur électrique.

Dans ce modèle, les hydrocarbures ne disparaissent pas comme ressource industrielle. Ils peuvent quitter progressivement la production massive d'électricité et de chaleur pour être réorientés vers la chimie, les matériaux, les composites carbone, les produits synthétiques et les chaînes où le carbone reste une matière première plutôt qu'un combustible.

Pour les industries actuelles de l'énergie carbonée, ce n'est pas seulement une menace, mais une voie de transition. Entreprises, États et fonds liés au pétrole, au gaz et au charbon peuvent obtenir un accès prioritaire aux investissements dans le solaire spatial, l'énergie orbitale, la chimie des hydrocarbures et les matériaux carbone. StarRoad devient alors un mécanisme de conversion maîtrisée plutôt qu'un simple concurrent.

8.3.1. Échelle du remplacement énergétique

Un gigawatt électrique continu produit environ **8,76 TWh par an**. Une centrale solaire spatiale de 2 GW disponible à 99,7 % produit environ **17,47 TWh par an**.

Ainsi :

- 100 GW de production orbitale donnent environ **876 TWh/an** ;
- 1 TW donne environ **8 760 TWh/an** ;
- 3 TW donnent environ **26 280 TWh/an, soit un ordre comparable à la consommation mondiale actuelle d'électricité**.

La production mondiale d'électricité en 2024 est **d'environ 30 800 TWh**, dont quelque 18 200 TWh d'origine fossile. **L'échelle du défi est claire** : même un remplacement partiel exige des centaines ou des milliers de gigawatts de nouvelle puissance stable, pas quelques dizaines.

8.3.2. Rythme possible de remplacement si StarRoad transporte des centrales solaires spatiales

Le tableau donne une limite technique : ce qui se passe si une part importante des lancements met en service une centrale **de 2 GW par voyage**. **Ce n'est** ni une prévision ni une promesse, mais un rythme possible si d'autres conditions sont

réunies : production en série, rectennas et raccordements prêts, acceptation politique et juridique, financement, maintenance et marchés capables d'absorber l'énergie.

Période d'exploitation de StarRoad	Lancements annuels du modèle économique	Nouvelle puissance solaire spatiale par an	Nouvelle production annuelle après déploiement	Part de la production fossile en 2024, ≈18 200 TWh/an	Part de la production électrique mondiale en 2024, ≈30 800 TWh/an
Années 1–2	12–24	24–48 GW/an	210–419 TWh/an	1,2–2,3%	0,7–1,4%
Années 3–5	50–100	100–200 GW/an	873–1 747 TWh/an	4,8–9,6%	2,8–5,7%
Années 6–10	200–300	400–600 GW/an	3 493–5 240 TWh/an	19–29%	11–17%
Années 11–15	500–700	1 000–1 400 GW/an	8 734–12 227 TWh/an	48–67%	28–40%
Années 16–25	1000+	2 000+ GW/an	17 467+ TWh/an	96%+	57%+
Années 26 et suivantes	1500+	3 000+ GW/an	26 201+ TWh/an	144%+	85%+

Le tableau montre pourquoi le solaire spatial est un marché primaire naturel pour StarRoad. Une centrale de 2 GW par lancement crée déjà un flux énergétique important au début ; l'exploitation mature devient un outil à l'échelle planétaire.

Il ne s'agit toutefois pas d'un calendrier garanti de décarbonation. Le remplacement réel dépend non seulement de la capacité de lancement de StarRoad, mais aussi :

- du rythme de production des centrales solaires spatiales ;
- de la fabrication de l'électronique de puissance, des radiateurs, des structures, des émetteurs micro-ondes et des systèmes de commande ;
- de la construction des rectennas au sol ;
- de la capacité des réseaux électriques ;
- de l'autorisation politique du transfert d'énergie par micro-ondes ;
- du partage international des avantages et des risques ;
- de l'assurance et de la réglementation de l'énergie orbitale ;
- de la maintenance, de la réparation et du démantèlement des centrales ;
- de la concurrence du solaire terrestre, de l'éolien, du nucléaire, de l'hydraulique et de la géothermie.

La formulation exacte est donc la suivante : **StarRoad rend techniquement possible un rythme de remplacement comparable à l'échelle de l'électricité fossile mondiale, mais la vitesse réelle dépend de la fabrication, des réseaux, des rectennas, de la politique et du marché.**

8.3.3. Conversion industrielle de l'énergie carbonée

Si la production des centrales suit la cadence de StarRoad, une énergie orbitale de classe térawatt peut être créée en une ou deux décennies. Elle ne supprime pas toute l'énergie terrestre mais en change le rôle : réseaux, nucléaire, hydraulique, renouvelables, géothermie et stockage forment un système hybride où l'orbite couvre la base, l'industrie et l'exportation.

Dans ce scénario, l'énergie carbonée ne se contente pas de « perdre ». Une voie de conversion s'ouvre :

- les centrales au charbon et au gaz quittent progressivement la production de base ;
- une partie des infrastructures gazières passe à la réserve, à la chimie et aux produits synthétiques ;
- les entreprises pétrolières et gazières investissent dans le solaire spatial, les rectennas, la chimie des hydrocarbures et les matériaux carbone ;
- l'industrie charbonnière se réoriente vers les composites carbone, les réducteurs, les matières chimiques et les matériaux ;
- certaines entreprises énergétiques historiques exploitent désormais la production orbitale, les rectennas et la distribution électrique.

L'enjeu politique et économique n'est pas d'exiger l'autodestruction immédiate de secteurs puissants, mais de leur proposer une transition. Si l'industrie carbonée peut maintenir ou relever ses marges grâce au solaire spatial et à la chimie, la résistance au changement peut être nettement moindre.

8.3.4. Différence avec l'agenda « vert » habituel

StarRoad propose une expansion énergétique, non une austérité énergétique. Sa logique climatique ne réduit pas la capacité de la civilisation : elle la transfère dans une infrastructure plus durable.

Cela diffère des approches perçues comme exigeant de « vivre moins bien pour le climat ». Le solaire spatial associé à StarRoad permet une autre vision :

- plus d'énergie, pas moins ;
- moins d'émissions, pas moins d'industrie ;
- plus de puissance informatique disponible, pas de restriction de l'économie numérique ;
- davantage d'électrification des transports, de la production et de la vie quotidienne ;
- davantage de possibilités pour les régions en développement ;
- moins de dépendance aux ressources fossiles comme combustibles, tout en conservant le carbone comme matière première industrielle.

Cette approche correspond mieux à la logique civilisationnelle de StarRoad : le projet ne demande pas à l'humanité de se réduire ; il crée l'infrastructure permettant de croître sans l'ancienne empreinte carbone.

8.3.5. Conclusion : le solaire spatial comme marché primaire

Les centrales solaires spatiales de classe gigawatt ne sont pas une application secondaire de StarRoad, mais l'un des fondements de sa nécessité économique.

Elles permettent simultanément de :

- créer une demande massive de lancements super lourds ;
- produire un revenu commercial clair par la vente d'énergie ;
- alimenter la future industrie orbitale ;
- stimuler la construction de rectennas, relais, remorqueurs, chantiers navals et habitats de service ;
- ouvrir une nouvelle niche d'investissement aux industries de l'énergie carbonée ;
- fournir un véritable mécanisme d'action climatique à l'échelle planétaire.

Dans la logistique des fusées, ces centrales restent trop lourdes, coûteuses et complexes. Dans celle de StarRoad, elles deviennent une cargaison naturelle produite en série : non une « mission exceptionnelle », mais un produit énergétique d'une grande industrie d'infrastructure.

8.4. Sites orbitaux : GEO et EML4/5

Les principaux emplacements des centrales solaires spatiales et de leurs infrastructures sont l'orbite géostationnaire et les points de Lagrange Terre–Lune EML4/5.

L'orbite géostationnaire convient bien à la transmission d'énergie vers des régions fixes de la Terre. Un satellite ou une plateforme énergétique en GEO conserve une position presque constante par rapport à la surface, ce qui simplifie le pointage du faisceau micro-ondes, l'implantation des rectennas au sol et l'intégration aux réseaux régionaux. L'altitude géostationnaire est d'environ 35 800 km au-dessus de l'équateur.

EML4 et EML5 conviennent aux grands habitats, aux chantiers spatiaux, aux pôles industriels et aux grappes énergétiques. Ils se situent aux sommets de triangles équilatéraux dans le système Terre–Lune et présentent une stabilité à long terme supérieure à celle des points colinéaires L1/L2. C'est essentiel pour une industrie de masse : de grandes centrales, des entrepôts, des chantiers, des treillis d'assemblage et des complexes résidentiels peuvent y être installés sans consommation permanente de grandes quantités d'ergols pour le maintien à poste.

Le recours à GEO et EML4/5 réduit également les conflits avec l'orbite terrestre basse. Les centrales solaires et autres grandes plateformes n'ont pas à déployer d'immenses réseaux en LEO, où ils provoqueraient pollution lumineuse, risques de collision, traînée atmosphérique résiduelle et perturbations de l'astronomie. L'orbite basse reste une zone de service pour la descente des capsules, les opérations intermédiaires, les inspections et certaines tâches propres aux basses orbites.

8.5. Stade initial : vols directs d'AstroLiner-S

Le stade initial utilise AstroLiner-S, la version de départ de la navette, simplifiée et moins risquée. Elle n'emporte aucune source d'énergie nucléaire ou de fusion et utilise une propulsion chimique pour l'insertion finale, les corrections, la désorbitation et le retour.

L'objectif principal du stade initial est de créer un premier flux de fret sans attendre la maturité de toutes les infrastructures orbitales. AstroLiner-S doit donc pouvoir livrer directement de grands modules :

- en orbite géostationnaire pour installer des centrales solaires et des relais énergétiques ;
- dans les grappes énergétiques EML4/5 ;
- sur des orbites à haute énergie pour déployer des centrales solaires et des centres de données.

À ce stade, le fret se compose principalement de structures complètes ou presque complètes :

- centrales solaires spatiales auto-déployables ;
- modules de transmission d'énergie ;
- grands panneaux radiateurs ;
- blocs de calcul pour centres de données ;
- structures en treillis ;
- robots d'assemblage ;
- premières stations de service ;
- réserves d'ergols et de fluides de travail ;
- modules de communication, de navigation et de contrôle du trafic.

Avantages d'EML4/5 et de GEO par rapport à LEO :

- Absence de pollution lumineuse causée par les satellites en orbite basse.
- Éclairement presque continu des centrales solaires, sans cycle jour-nuit régulier.
- Position stable par rapport à la Terre et à la Lune.

Chiffres clés de l'étape :

- Fréquence des lancements : 1–2 par mois, soit 12–24 par an.
- Charge utile par vol : 10 000 t.
- Flux annuel de fret : 120 000–240 000 t.
- Coût de livraison : 80–120 \$/kg.
- Orbites cibles : EML4/5 et GEO.

Cette approche évite le piège qui consisterait à bâtir toute l'infrastructure spatiale avant de percevoir le moindre revenu. Les premières charges commerciales sont elles-mêmes des éléments de l'infrastructure future.

8.6. Stade de maturité : relais micro-ondes et infrastructures de service

Le stade de maturité commence lorsque les centrales, les centres de données et les grandes plateformes sont assez nombreux pour maintenir un réseau orbital en fonctionnement continu. Il ne s'agit alors plus seulement de lancer de nouvelles installations, mais aussi d'entretenir celles qui sont déjà déployées.

Principaux éléments du stade de maturité :

- un réseau de relais micro-ondes en GEO ;

- des nœuds de service permanents près des principales grappes énergétiques ;
- des engins de réparation et d'inspection ;
- des stations de stockage ;
- des remorqueurs orbitaux ;
- les premiers habitats permanents et des équipages en rotation à EML4/5 ;
- des chantiers spatiaux automatisés et semi-automatisés ;
- un pôle de transport à EML1.

Les relais micro-ondes permettent de répartir l'énergie avec davantage de souplesse entre les régions terrestres, de moins dépendre d'une liaison géométrique directe entre la centrale et la rectenna, et de créer un réseau énergétique plutôt qu'un ensemble de centrales orbitales isolées. Au sol, le système doit comprendre des rectennas de réception, des postes de conversion, des moyens de stockage tampon et des raccordements aux réseaux régionaux.

La maintenance permanente prolonge la durée de vie des centrales solaires. C'est fondamental : sans maintenance, leur économie reste limitée par la durée de vie de chaque module. Si les panneaux, les émetteurs, les radiateurs, l'électronique et les treillis peuvent être remplacés en orbite, les centrales deviennent des installations énergétiques maintenables plutôt que des satellites jetables.

8.7. Répartition des transports selon le milieu d'exploitation

La logistique StarRoad arrivée à maturité sépare les fonctions de transport selon leur milieu d'exploitation, au lieu de s'appuyer sur un engin spatial universel.

AstroLiner assure les transports de la Terre vers l'orbite et de l'orbite vers la Terre. C'est un véhicule orbital de transport lourd, un planeur de retour et un porte-conteneurs lourd, mais il ne doit pas devenir un engin interplanétaire universel.

Les transports interorbitaux évoluent exclusivement dans l'espace. Ils ne pénètrent pas dans une atmosphère et n'emportent donc ni bouclier thermique d'atterrissage, ni ailes, ni systèmes maritimes, ni coque renforcée pour l'amerrissage. Leur masse à vide est moindre et leur durée de vie supérieure, car ils sont optimisés pour les trajets entre nœuds orbitaux.

Des capsules spécialisées descendent vers les planètes et ramènent des personnes ou du fret à la surface. Elles ne doivent pas faire partie de la coque principale d'AstroLiner : il serait irrationnel de faire redescendre plusieurs milliers de tonnes simplement pour livrer un petit groupe de personnes ou une faible cargaison.

La hiérarchie des transports est la suivante :

Milieu	Véhicule principal	Fonction
Terre → orbite	AstroLiner / AstroLiner-S	transport super lourd de fret et de modules
Orbites hautes et points de Lagrange	transports et remorqueurs interorbitaux	transport entre LEO, GEO et EML1/2/4/5
Orbite → surface	capsules de transport de personnes et de fret	descente de personnes et de fret
Nœuds orbitaux	stations, entrepôts et chantiers spatiaux	stockage, assemblage, réparation et transbordement

Cette répartition réduit la masse à vide de chaque catégorie de véhicule, limite les compromis et rapproche la logistique spatiale du transport maritime, avec des porte-conteneurs, des remorqueurs, des ports, des entrepôts, des chantiers navals et des bâtiments spécialisés.

8.8. Rôle d'AstroLiner dans une logistique arrivée à maturité

AstroLiner n'est pas un engin spatial universel. Son rôle principal est celui d'un véhicule super lourd assurant des rotations vers l'orbite et d'un moyen de retour réutilisable.

Il transporte vers le haut :

- des conteneurs de fret ;
- des modules habités ;

- des modules d’ergols ;
- des éléments de construction ;
- des panneaux, des treillis, des câbles et des radiateurs ;
- des remorqueurs interorbitaux, assemblés ou en pièces détachées ;
- des capsules de descente ;
- des modules de stations orbitales ;
- des composants de centrales électriques et de centres de données.

Il revient le plus souvent à vide ou avec un fret de retour limité :

- équipage ;
- échantillons ;
- ensembles coûteux et réparables ;
- électronique retirée du service ;
- composants défaillants ou déposés.

La configuration de retour doit être aussi légère que possible. Une fois sa mission accomplie, la masse de retour d’AstroLiner doit être nettement inférieure à sa masse de lancement, car le vol plané, la rentrée atmosphérique et l’amerrissage en sécurité exigent une masse résiduelle minimale. Le retour sur Terre de milliers de tonnes de charge utile n’est pas une opération courante ; il relève de capsules spécialisées ou de modules de retour distincts.

AstroLiner conserve une réserve limitée de delta-v pour quatre raisons :

1. rester indépendant d’une infrastructure qui n’est pas encore entièrement déployée ;
2. pouvoir emprunter des itinéraires de remplacement ;
3. faire face aux situations d’urgence ;
4. garder une certaine souplesse pendant les premières années d’exploitation.

Dans un système arrivé à maturité, les remorqueurs et transports spécialisés fournissent toutefois l’essentiel du delta-v interorbital. Cela réduit les contraintes imposées à AstroLiner, prolonge la vie de sa coque et raccourcit le cycle lancement–déchargement–retour–entretien–nouveau lancement.

8.9. transports et remorqueurs interorbitaux

Les transports interorbitaux constituent la flotte spatiale permanente de StarRoad. Ils circulent entre LEO, GEO, EML1, EML2, EML4/5 et d’autres nœuds sans pénétrer dans l’atmosphère ni revenir sur Terre.

Leurs missions comprennent :

- acheminer les modules du point de déchargement d’AstroLiner vers leur orbite cible ;
- remorquer les centrales solaires, les centres de données et les grands treillis ;
- transporter les ergols et les fluides de travail ;
- transporter les modules habités ;
- entretenir et remplacer les composants des centrales ;
- acheminer les capsules vers une orbite de service avant leur descente ;
- ramener les remorqueurs vides vers EML1 ou EML4/5 ;
- assister les chantiers spatiaux.

Ces engins peuvent recourir à une propulsion électrique, magnétoplasmadynamique, nucléaire-électrique, solaire-électrique ou hybride. Comme ils ne doivent jamais entrer dans une atmosphère, ils peuvent être fortement spécialisés : grands radiateurs, treillis légers, vastes réservoirs de fluide de travail, propulseurs remplaçables et entretien dans les chantiers orbitaux.

Dans l'architecture arrivée à maturité, le transport interorbital est ce qui transforme StarRoad, de système de lancement, en réseau de transport spatial.

8.10. Descente vers la Terre et les autres planètes

Des capsules spécialisées assurent la descente ; AstroLiner n'a donc pas à servir de véhicule de rentrée universel pour chaque mission.

Principaux types :

Capsule passagers (PC) — capsule destinée aux personnes, conçue pour une rentrée sûre, les situations d'urgence, un atterrissage autonome et l'intégration à un module habité.

Capsule cargo (CCap) — capsule destinée au fret de valeur, aux échantillons, aux équipements, aux matières biologiques, à l'électronique et aux composants qui doivent revenir à la surface.

Capsule de retour industriel (IRC) — capsule cargo renforcée, destinée au retour en masse de matériaux si un tel marché apparaît à un stade ultérieur.

AstroLiner place les capsules en orbite. Des remorqueurs interorbitaux, ou AstroLiner lui-même pendant la phase initiale, les transfèrent ensuite sur une orbite de service pour la descente. Après séparation, chaque capsule effectue sa rentrée et son atterrissage de manière autonome.

La Lune, Mars, Vénus et les astéroïdes utilisent des systèmes d'atterrissage distincts, adaptés à chaque milieu. Aucun engin de descente universel ne peut desservir tous les corps du Système solaire, car les atmosphères, la gravité, les flux thermiques, les poussières et les exigences de décollage diffèrent trop fortement.

8.11. Modules normalisés

La normalisation est le fondement de la logistique StarRoad. De même que la conteneurisation maritime a transformé le commerce mondial, les modules orbitaux normalisés doivent transformer l'économie spatiale.

Types de modules de base :

Module passagers (PM) — module pressurisé utilisable dans AstroLiner, un transport interorbital, une station orbitale ou une capsule passagers. Il comprend un système de survie, des sièges ou des cabines, des réserves d'urgence, des interfaces d'amarrage et des points d'attache normalisés.

Conteneur cargo (CC) — conteneur pressurisé ou non destiné aux panneaux, treillis, radiateurs, câbles, équipements, systèmes robotiques, pièces de rechange et consommables.

Module d'ergols (PrM) — module de stockage d'ergols, de fluide de travail, d'eau, d'oxygène, d'hydrogène, d'argon, de xénon ou d'autres consommables pour les remorqueurs et les stations.

Module de servitude (UM) — module d'alimentation, de refroidissement, de communication ou de contrôle pouvant comprendre des panneaux solaires, des batteries, des radiateurs, des antennes, des convertisseurs, des échangeurs thermiques et de l'électronique de commande.

Module de construction (CM) — module contenant des treillis, des poutres, des sections de charpente, des robots d'assemblage, des systèmes de fixation, des longes, des chemins de câbles et des structures déployables.

Module de transmission d'énergie (PTM) — module contenant des antennes micro-ondes, des réseaux phasés, de l'électronique de puissance et des systèmes de pointage et de contrôle du faisceau.

Chaque module doit posséder des éléments normalisés :

- classes dimensionnelles ;
- interfaces structurelles ;
- points de préhension robotisés ;
- interfaces d'amarrage ;
- interfaces électriques et thermiques ;
- identité numérique et dossier de maintenance ;
- plages autorisées de masse et de centre de gravité ;

- modes d'arrimage et de séparation d'urgence.

Les stations, les engins spatiaux, les centrales et les complexes industriels peuvent ainsi être assemblés à partir de blocs standard plutôt que conçus chaque fois comme des véhicules uniques.

8.12. Hiérarchie des infrastructures orbitales

La logistique orbitale de StarRoad est organisée en une hiérarchie de nœuds.

Terre / StarRoad. Fabrication,

assemblage, lancement, réparation d'AstroLiner, production des modules, préparation des ergols, fourniture d'énergie et gestion des flux de fret.

LEO.

Zone de service pour la descente des capsules, les inspections, les urgences, les opérations temporaires et la séparation des capsules avant leur rentrée. Dans le système arrivé à maturité, LEO n'est ni l'entrepôt principal, ni une ceinture industrielle surchargée.

GEO.

Zone de relais micro-ondes, de plateformes énergétiques, de communications et de transmission d'énergie vers des régions fixes de la Terre. GEO convient bien à l'intégration de l'énergie orbitale aux réseaux terrestres.

EML1.

Principal pôle de transport du système Terre–Lune. AstroLiner peut y arriver directement pour décharger des modules lorsqu'une charge n'a pas besoin d'être acheminée sans escale jusqu'à sa destination finale. On y trouve des entrepôts, des remorqueurs, un contrôle du trafic, des nœuds de réparation et la station de correspondance de l'ascenseur lunaire.

EML1 doit être fortement automatisé. Une importante population permanente n'y est pas nécessaire : les personnes peuvent séjourner dans les tunnels de lave lunaires, mieux protégés, à EML4/5 ou à bord de grandes stations, et se rendre à EML1 lorsque leur présence est requise.

EML2.

Zone scientifique et d'observation accueillant des observatoires à silence radio, des télescopes de l'espace lointain, des stations d'essai, des communications avec l'espace lointain et des installations scientifiques sur la face cachée de la Lune et à proximité.

EML4 / EML5.

Principaux centres d'une civilisation orbitale arrivée à maturité : chantiers spatiaux, habitats, stations industrielles, grandes centrales, assemblage d'engins interplanétaires, entrepôts, bases de réparation et centres de commande de la poursuite de l'expansion.

8.13. Chantiers spatiaux

Les chantiers spatiaux sont établis principalement à EML4/5. Leur rôle consiste à assembler les structures qui, même avec StarRoad, ne peuvent ou ne doivent pas être lancées en un seul bloc.

AstroLiner leur livre les matériaux et les structures sous forme de fret à plat :

- panneaux ;
- treillis ;
- profilés structurels ;
- câbles ;
- radiateurs ;
- miroirs ;
- membranes ;
- réservoirs ;
- ensembles porteurs ;
- systèmes robotisés d'assemblage.

L'assemblage est effectué par des robots et des téléopérateurs. Les personnes assurent la maintenance, la supervision, les réparations complexes et les décisions exceptionnelles, mais ne doivent pas réaliser manuellement la majeure partie des travaux d'assemblage dangereux.

Les chantiers construisent :

- de nouvelles centrales solaires spatiales ;
- de vastes champs de radiateurs ;
- des transports interorbitaux ;
- des engins interplanétaires ;
- des stations résidentielles ;
- des complexes de traitement des astéroïdes ;
- des éléments de futures mégastructures.

À ce stade, StarRoad cesse d'être seulement un système de lancement depuis la Terre. Il devient le maillon inférieur d'une chaîne de production dans laquelle la Terre fournit les composants complexes, tandis que l'espace prend progressivement en charge l'assemblage, la maintenance et une partie de la fabrication.

8.14. Habitats orbitaux et lunaires

Les habitats permanents n'apparaissent pas comme une fin en soi, mais parce qu'il faut entretenir de vastes infrastructures. Lorsque les centrales, les chantiers, les remorqueurs, les relais, les centres de production lunaires et les plateformes industrielles se multiplient, la maintenance entièrement à distance ne suffit plus.

La principale forme d'habitat orbital de grande taille est une station rotative à gravité artificielle, comme un tore de Stanford ou un modèle dérivé. Ces stations sont surtout implantées dans des sites stables propices au développement de long terme, notamment EML4/5, et servent de centres résidentiels, techniques, médicaux, administratifs et de réparation pour l'industrie orbitale.

Le personnel permanent des bases lunaires et des implantations industrielles devrait vivre non pas sur la Lune elle-même, mais dans des stations à gravité artificielle à EML4/5. Cela limite les effets à long terme de la faible gravité lunaire sur la santé tout en maintenant le personnel à proximité des infrastructures lunaires. La Lune devient alors principalement un site industriel où les équipes de surface travaillent par rotation.

EML1 devient le principal pôle de correspondance et de logistique du système lunaire. Il concentre les entrepôts, les quais, les remorqueurs, les modules de ravitaillement, les moyens de réparation et le contrôle des flux entre la Terre, la Lune, EML4/5 et les autres régions orbitales. Maintenir le personnel près de la Lune facilite les rotations, les interventions d'urgence, les réparations et la conduite de la production lunaire, par rapport à des équipages envoyés chaque fois depuis la Terre.

Un ascenseur lunaire reliant la surface de la Lune à la région d'EML1 est un élément majeur de cette architecture. Il assure un trafic régulier de fret et de passagers entre la surface et les infrastructures orbitales : régolithe, oxygène, métaux, matériaux de construction et modules industriels montent, tandis qu'équipements, consommables et équipes de relève descendent. Il relie durablement l'industrie lunaire aux chantiers orbitaux, aux habitats et à la logistique interorbitale, sans lancements incessants de fusées depuis la surface.

En raison de la faible gravité lunaire, les habitats lunaires seront surtout des bases industrielles protégées, exploitées par des équipes en rotation. Ils soutiennent des complexes miniers, de traitement, d'énergie et de construction, des équipements automatisés, la production d'oxygène, le traitement du régolithe, l'assemblage d'éléments de l'ascenseur lunaire et la préparation du fret destiné à EML1.

La radioprotection des habitats orbitaux et lunaires repose sur plusieurs couches :

- blindage passif par l'eau, le polyéthylène, le régolithe lunaire, le carburant ou les réserves techniques ;
- implantation des zones les mieux protégées dans les parties centrales et intérieures ;
- protection magnétique active destinée à réduire le flux de particules chargées ;
- abris d'urgence contre les événements de protons solaires.

L'eau, l'hydrogène, le polyéthylène, le carburant et le régolithe lunaire sont à la fois des réserves utiles et une masse de blindage. La protection ne doit pas nécessairement constituer une masse morte lorsqu'elle peut s'intégrer au cycle d'exploitation d'une station, d'une base lunaire, d'un ascenseur lunaire ou d'un nœud EML1.

8.15. Analogie logistique : l'espace comme réseau maritime

Un système StarRoad arrivé à maturité ressemble davantage à une logistique maritime qu'à un programme de lancement.

Dans cette analogie :

- **AstroLiner** est un porte-conteneurs super lourd entre la Terre et l'orbite ;
- **les remorqueurs interorbitaux** sont des remorqueurs portuaires et de haute mer ;
- **les transports interorbitaux sont** des navires de ligne au long cours ;
- **EML1** est un port de transit et un pôle de distribution ;
- **GEO** est une rade énergétique et de communication ;
- **EML4/5 sont** des ports industriels, des chantiers navals et des villes ;
- **les capsules** sont des engins de débarquement spécialisés ;
- **les modules PM, CC, PrM, UM, CM et PTM** sont des conteneurs et des blocs fonctionnels.

Cette approche transforme la culture même du vol spatial. Les missions uniques cèdent la place aux horaires, à la circulation des conteneurs, à la réparation, à l'assurance, aux normes, aux entrepôts, au contrôle du trafic portuaire et au fret industriel.

8.16. Économie des flux de fret

StarRoad inverse la règle centrale de l'économie spatiale. Avec les fusées, il est plus avantageux d'économiser chaque kilogramme, car chacun coûte cher. Avec la logistique StarRoad, il est plus avantageux de normaliser, de produire en série et de lancer par grands lots.

Cela modifie les choix d'ingénierie :

- les structures peuvent être plus robustes et plus faciles à réparer ;
- les équipements peuvent disposer de marges plus importantes ;
- les stations peuvent être conçues comme des installations maintenables plutôt que comme des satellites jetables ;
- la masse des radiateurs, des blindages et des structures cesse d'être une contrainte absolue ;
- les grandes plateformes deviennent plus économiques qu'une multitude de petits engins à courte durée de vie.

L'effet économique essentiel est que StarRoad crée un marché des installations orbitales, et pas seulement un marché du lancement. Les recettes peuvent provenir non seulement de la livraison de fret, mais aussi de la fabrication, de la propriété et de l'exploitation de centrales, de centres de données, de relais, de remorqueurs, de chantiers spatiaux et de réseaux énergétiques.

Parmi les modèles commerciaux possibles :

- vente de lancements à des clients extérieurs ;
- contrats à long terme pour les infrastructures énergétiques ;
- propriété et exploitation de centrales solaires spatiales ;
- coentreprises avec des énergéticiens ;
- location de capacités dans des centres de données orbitaux ;
- vente d'électricité au moyen de rectennas au sol ;
- contrats de service pour les installations orbitales ;
- tarifs logistiques pour le transport interorbital ;
- assurance, réparation et prolongation de la durée de vie des stations.

Cette approche réduit la dépendance à l'égard d'un marché unique. Si la demande extérieure de lancements est insuffisante, StarRoad crée son propre flux de fret au moyen de programmes énergétiques et industriels orbitaux.

8.17. Étapes du développement des marchés et de la logistique

Le développement des débouchés et de la logistique orbitale se déroule en quatre étapes.

I. Étape de base (10 à 20 ans) — flux énergétique. AstroLiner-S lance

des centrales solaires spatiales complètes ou presque, des centres de données, des relais, des modules de service et les premiers remorqueurs. L'objectif principal est de démontrer la régularité des lancements, de créer les premières installations énergétiques commerciales et d'ouvrir le marché de la production orbitale.

II. Étape mature (20 à 50 ans) — réseau de services orbitaux. Des

relais GEO, un nœud EML1, des stations de service, des engins de réparation, des remorqueurs, ainsi que les premiers habitats permanents et chantiers navals en EML4/5 apparaissent. AstroLiner passe peu à peu des vols directs vers chaque destination au rôle d'ascenseur lourd déchargeant dans les nœuds du réseau.

III. Étape industrielle (50 à 100 ans) — production extraterrestre. La

construction active de vaisseaux interplanétaires, d'usines de traitement d'astéroïdes et de grands habitats orbitaux commence. Le système utilise progressivement des matériaux extraterrestres et réduit sa dépendance aux matières premières massives expédiées depuis la Terre.

IV. Étape évolutive et potentielle (100 ans et plus) — infrastructure du Système solaire. EML4/5

deviennent les points de départ de l'expansion dans le Système solaire, de la construction de mégastructures, d'essaims solaires, de cylindres d'O'Neill, de télescopes lointains et de missions interstellaires.

Cet enchaînement est essentiel : StarRoad n'exige pas une civilisation spatiale déjà achevée. Il commence par des débouchés clairs — énergie et calcul — puis développe progressivement une économie spatiale complète.

8.18. Perspectives d'évolution : le successeur de StarRoad

StarRoad ne représente pas nécessairement la forme ultime des infrastructures de transport planétaire. Il peut être considéré comme une étape transitoire, mais indispensable, entre l'ère des fusées et les mégastructures d'astro-ingénierie arrivées à maturité.

Parmi les systèmes hypothétiques connus — ascenseur spatial, boucle de lancement, StarTram, anneau orbital et tour spatiale — seul un anneau orbital perfectionné pourrait à terme dépasser StarRoad en capacité de fret. Une telle structure exige toutefois une industrie orbitale puissante et déjà établie, des quantités immenses de matériaux, des chantiers spatiaux, de l'énergie, un assemblage robotisé et l'expérience de l'exploitation des mégastructures.

Un successeur possible de StarRoad serait un système de deux anneaux reliés :

- un anneau de transport entourant la Terre et dont le point bas rejoint la surface ;
- un anneau portuaire géosynchrone et un dock spatial à l'altitude GEO ;
- plusieurs rotors à câble mobiles dans des gaines étanches à l'intérieur de l'anneau de transport ;
- une liaison entre l'anneau de transport et l'anneau portuaire géosynchrone au point culminant de la trajectoire.

Comme une boucle de lancement, l'anneau de transport contient des rotors se déplaçant à grande vitesse dans des canaux étanches, mais il pourrait être plus sûr. Contrairement à une boucle, ses rotors à câble mobiles ne prennent aucun virage serré et subissent des charges radiales bien plus faibles ; en cas de rupture, ils peuvent être conçus pour s'éloigner de la planète sans détruire toute la structure. L'anneau de transport formerait une tour spatiale annulaire dynamique, s'étendant de la surface à l'anneau portuaire géosynchrone.

Ce système n'est pas une solution de remplacement pour le premier StarRoad, mais un successeur possible. Sans StarRoad ou un réseau structurant comparable, la masse, les équipements, les chantiers et la capacité énergétique nécessaires à un anneau orbital ne pourront pas être envoyés à un coût suffisamment bas.

8.19. Potentiel d'ingénierie planétaire : le Système solaire comme ensemble de ressources

StarRoad pourrait à terme ouvrir des possibilités aujourd'hui inimaginables, notamment l'astro-ingénierie à grande échelle et la terraformation. Ces scénarios tardifs de développement civilisationnel n'apparaissent qu'après la mise en place

d'infrastructures matures dans le Système solaire : transport à bas coût depuis la Terre, énergie solaire spatiale, chantiers orbitaux à EML4/5, exploitation des astéroïdes, transports interplanétaires, flotte de navires-citernes et énergie autonome pour les missions lointaines.

L'idée essentielle consiste à traiter Vénus et Mars non comme deux programmes indépendants, mais comme un même système de ressources. Mars manque d'azote, d'hydrogène, d'une atmosphère dense et de protection magnétique. Vénus possède d'immenses réserves de CO₂ et d'azote, ainsi qu'une masse et une gravité proches de celles de la Terre, mais ces ressources sont enfermées dans un milieu extrême : température d'environ 460 °C, pression proche de 92 atmosphères, atmosphère de CO₂, nuages d'acide sulfurique, absence de champ magnétique et rotation rétrograde extrêmement lente.

8.19.1. Étape préalable : infrastructures du Système solaire

Avant toute terraformation planétaire, il faut disposer des éléments suivants :

- StarRoad comme voie de transport de masse à bas coût depuis la Terre ;
- des centrales solaires spatiales et des essaims solaires comme sources d'énergie ;
- des chantiers orbitaux à EML4/5 ;
- une exploitation minière avancée des astéroïdes pour en extraire les métaux, l'eau et les matières volatiles ;
- des dizaines ou des centaines d'habitats spatiaux avancés et autonomes, ainsi que les nœuds énergétiques qui les alimentent ;
- une flotte de navires-citernes transportant hydrogène, eau, azote et CO₂ ;
- des systèmes de transport nucléaire-électrique ou à fusion pour les longs trajets.

Une date raisonnable de lancement de tels programmes ne se situe pas avant plus de 100 ans après le début de l'exploitation de StarRoad, avec une accélération possible si les infrastructures spatiales connaissent une croissance exponentielle.

8.19.2. Vénus : étapes de la terraformation

Vénus pourrait se prêter mieux que Mars à un habitat humain massif et durable : sa gravité est d'environ 0,9g, sa masse est proche de celle de la Terre et l'énergie solaire y est abondante. Le problème central réside dans la barrière initiale extrêmement élevée.

1. Refroidissement et dépôt du CO₂

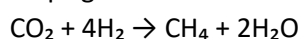
. Un vaste écran solaire est placé au point L1 Vénus–Soleil afin de réduire l'énergie reçue. Sous l'effet d'un refroidissement profond, une part importante du CO₂ devient liquide ou solide et se dépose à la surface. La pression chute fortement, transformant un milieu infernal en un environnement accessible aux travaux d'ingénierie et de construction.

2. Anneau quasi synchrone et port orbital. Après le

refroidissement, un anneau à soutien dynamique est construit à environ 33 400 km au-dessus de la surface, à l'altitude de la future orbite synchrone de 24 heures de Vénus. Sa circonférence est d'environ 248 000 km, la gravité locale d'environ 0,021g et la vitesse orbitale circulaire libre d'environ 2,87 km/s. Tant que la rotation de Vénus reste trop lente, des rotors actifs soutiennent l'anneau, qui sert de port orbital, de nœud énergétique et de point d'accueil des navires-citernes.

3. Traitement de l'atmosphère et importation d'hydrogène

. Le CO₂ déposé est remonté vers des complexes de traitement. L'hydrogène vient du Système solaire externe, des corps glacés et des ressources astéroïdales. La réaction fondamentale de fixation du CO₂ est la suivante :



L'eau sert à former les océans et à fournir de l'oxygène ; le méthane devient un carburant et une matière première chimique ; le carbone est fixé dans des matériaux et des réserves de longue durée ; les composés soufrés sont convertis sous forme minérale. L'excédent d'azote et une partie du CO₂ peuvent être expédiés vers Mars.

4. Une Vénus habitable.

La terraformation primaire peut être considérée comme achevée après la formation d'océans, d'une atmosphère d'azote et d'oxygène, d'un climat régulé, d'une protection magnétique ou magnétosphérique et d'une première biosphère. Vénus peut être habitable même avec une période de rotation intermédiaire d'environ 120 heures : les

nuits d'environ 60 heures sont tempérées par les océans, les nuages, une atmosphère de 1,3–1,6 bar, le transport de chaleur et un système de miroirs et d'écrans.

5. Correction orbitale de la rotation et journée de 24 heures. Porter Vénus

à une période de 24 heures n'est pas une condition préalable à son habitabilité, mais un perfectionnement technique de longue haleine. Le passage de la rotation rétrograde actuelle à une rotation directe de 24 heures exige un apport de moment cinétique d'environ $4,3 \times 10^{33} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$. Avec une vitesse d'éjection du fluide de travail proche de 100 km/s, il faut environ $1,1 \times 10^{21} \text{ kg}$ de fluide. Pour une énergie cinétique idéale des jets proche de $5 \times 10^{30} \text{ J}$, une puissance de 300 EW donne un délai d'environ 500–600 ans. En tenant compte des pertes techniques et d'une énergie de 10^{31} – $3 \times 10^{31} \text{ J}$, ce délai atteint environ 1 000–3 000 ans à 300 EW et plusieurs milliers d'années à 100–200 EW. Deux anneaux de transport, reliés symétriquement de part et d'autre de la planète comme de l'anneau quasi synchrone, transfèrent le moment de rotation de l'anneau à la surface. Le recours à deux anneaux, au lieu de l'anneau unique des configurations terrestre et martienne, apporte une stabilisation dynamique supplémentaire pendant ce transfert. Une fois la période de 24 heures atteinte, l'anneau devient un véritable dock vénusien synchrone.

8.19.3. Mars : étapes de la terraformation

Mars est plus facile pour implanter les premières bases, mais plus difficile à transformer en un environnement planétaire complet. Ses limites comprennent une gravité d'environ 0,38g, une atmosphère ténue, un manque d'azote, peu de matières volatiles accessibles et une faible protection magnétique. Mars exige donc non seulement des travaux locaux, mais aussi l'importation de matière depuis Vénus, les astéroïdes et le Système solaire externe.

1. Magnétosphère artificielle.

La protection magnétique est la première condition d'une terraformation durable : anneaux orbitaux comparables aux anneaux synchrone et de transport envisagés pour la Terre, plateformes énergétiques et réflectrices, et systèmes magnétiques intégrés à l'anneau synchrone. Sans elle, la nouvelle atmosphère reste exposée au vent solaire et à une lente érosion. Comme l'anneau quasi synchrone de Vénus, l'anneau synchrone martien combine des fonctions de transport, d'orbite, d'énergie et de magnétosphère. Des panneaux solaires et des moyens de stockage intégrés alimentent le circuit magnétosphérique, l'électronique de puissance et les infrastructures de contrôle de l'anneau qui entretiennent le champ magnétique artificiel de la planète.

2. Importation d'atmosphère

et d'eau. L'azote et une partie du CO_2 viennent de Vénus ; l'eau provient des astéroïdes, des corps glacés et du Système solaire externe. Mars n'est pas terraformée isolément : le réseau commun de ressources lui apporte les matières volatiles qui lui manquent. L'importation de l'atmosphère vénusienne procure à Mars un climat plus doux et plus stable plus tôt que la création et le réchauffement d'une atmosphère à partir des seules ressources martiennes.

3. Épaississement de l'atmosphère et réchauffement du climat

. Une fois la protection magnétique en place, le CO_2 , l'azote, la vapeur d'eau et d'autres agents à effet de serre épaississent progressivement l'atmosphère. Une atmosphère plus dense compense une partie du problème thermique de Mars, améliore le transport de chaleur, augmente la pression et agrandit les régions où l'eau liquide peut subsister.

4. Eau, sols et biosphère. Des

réservoirs sont créés, le régolithe est traité, la toxicité des sols est réduite et des écosystèmes microbiens et végétaux sont mis en place. Le développement se fait par étapes : biosphères locales protégées, puis zones climatiques régionales et, seulement ensuite, tentative de stabilisation de l'environnement planétaire.

5. Un environnement utilisable

à l'échelle de la planète. Avec des apports suffisants d'azote, de CO_2 et d'eau, Mars pourrait acquérir une atmosphère dense et régulée, une protection magnétique artificielle, des réserves d'eau, des régions biologiquement actives et une vaste infrastructure industrielle. Avec 0,38g, elle restera probablement moins propice que Vénus à une habitation massive, durable et comparable à celle de la Terre, mais sa faible gravité offre ses propres atouts : ascension et atterrissage moins coûteux, logistique orbitale commode, construction de structures immenses, production en faible gravité et rôle de pôle industriel, scientifique et de transit entre le Système solaire interne et la ceinture d'astéroïdes.

8.19.4. Avantage du scénario combiné

Un scénario combinant Vénus, Mars et le Système solaire externe est plus solide que l'une ou l'autre approche isolée. La terraformation de Mars seule est limitée par le manque d'azote, d'eau, d'énergie et de protection magnétique. Celle de Vénus

seule exige de traiter une immense atmosphère de CO₂ sans utilisateur extérieur pour les surplus. Le modèle commun transforme le problème d'une planète en ressource pour l'autre : l'azote et le CO₂ vénusiens soutiennent Mars, l'hydrogène et l'eau du Système solaire externe soutiennent Vénus, et l'industrie astéroïdale fournit les métaux et la masse de construction.

Dans cette logique, StarRoad n'est pas un outil direct de terraformation, mais le premier maillon d'une chaîne causale : StarRoad assure le transport de masse à bas coût ; les centrales solaires spatiales fournissent l'énergie ; EML4/5 accueille les chantiers ; l'exploitation des astéroïdes fournit les matières premières ; une flotte de navires-citernes échange la matière entre les planètes ; alors seulement l'ingénierie planétaire devient possible.

8.20. Conclusion stratégique

StarRoad et AstroLiner créent une économie spatiale permanente, et non un programme de lancement.

Les marchés initiaux sont l'énergie solaire spatiale, les centres de données orbitaux et les infrastructures énergétiques. Les marchés arrivés à maturité sont la maintenance, la réparation, le relais d'énergie, la logistique interorbitale, les chantiers et les habitats. Le stade industriel crée une économie astéroïdale et interplanétaire. Le stade évolutif ouvre la voie aux mégastructures, aux missions lointaines et à l'expansion durable de la civilisation.

L'idée centrale de cette section est que StarRoad ne cherche pas un marché au sein de l'ancien modèle spatial. Il crée un nouveau marché dans lequel les flux massifs de fret, l'énergie orbitale, les infrastructures informatiques et l'industrie spatiale forment un seul système logistique.

9. Modèle économique du projet

9.1. Méthode et hypothèses principales

Le modèle économique repose sur les principes suivants :

- **Production en série et fabrication** interne : les économies d'échelle réduisent de 30 à 50 % le coût des tunneliers, générateurs et stockages.
- **Localisation** : recours aux ressources, à la main-d'œuvre et aux matériaux africains, étayé par le Spon's African Construction Cost Handbook.
- **Prix de marché actuels** : données 2025–2026 pour les systèmes BESS et les centrales géothermiques.
- **Taux de change** : 1 USD ≈ 100 RUB / 0,90 EUR, à titre indicatif. Tous les calculs sont en dollars constants de 2025, hors inflation. Une incertitude de ±30 % correspond aux normes d'une préétude de faisabilité.

9.2. Coût du creusement dans les conditions africaines

Le Spon's African Construction Cost Handbook détaille les coûts de main-d'œuvre et de matériaux dans 13 pays africains. Il ne donne pas de coût unitaire direct pour les tunnels de très grande section, les conditions étant trop variables, mais permet de calibrer les estimations.

Type de travaux	Volume	Coût moyen par km	Coût total (milliards USD)	Justification
Tunnel principal (17,5 × 12,5 m)	2 050 km	12 à 18 millions de dollars	\$24.6–36.9	Extrapolation des données mondiales sur les grandes sections, corrigée pour les conditions africaines.
Tunnels collecteurs (6 × 2 050 km, ø2 m)	12 300 km	3 à 5 millions de dollars	\$36.9–61.5	Fondé sur des données réelles de travaux miniers africains : 3 500 dollars/m pour les petites sections.
Tunnel de service (ø3 m)	2 050 km	4 à 6 millions de dollars	\$8.2–12.3	Comme les collecteurs, avec correction pour la section supérieure.
Tunnels inclinés (40 × 16 km, 17,5 × 12,5 m)	640 km	12 à 22 millions de dollars	\$7.7–14.1	Comme le tunnel principal, avec majoration pour la pente de 30°.
Creusement total	17 040 km		\$77.4–124.8	

9.3. Parc de tunneliers avec production interne

Une commande en série de 40 tunneliers principaux, 240 collecteurs et 40 de service, avec une chaîne d'assemblage au Gabon et en République démocratique du Congo, réduit les coûts de 30 à 50 %.

Type de bouclier	Diamètre	Quantité	Prix unitaire, série et fabrication interne	Total (milliards USD)
Tunnelier principal (SR-Main)	environ 18 m	40 unités	35 à 60 millions de dollars	\$1.4–2.4
Tunneliers collecteurs (SR-Collector)	2 m	240 unités	0,8 à 1,5 million de dollars	\$0.19–0.36
Tunnelier de service (SR-Service)	3 m	40 unités	1,2 à 2 millions de dollars	\$0.05–0.08
Usines d’assemblage (2)	—	—	1 à 2 milliards de dollars	\$1–2
Total des tunneliers				\$2.64–4.84

9.4. Système géothermique autonome d’énergie thermique

La centrale géothermique réelle de Menengai, au Kenya, d’une puissance de 35 MW, a coûté environ 35 à 40 millions de dollars, soit 1 000 à 1 250 dollars/kW, forage et puits de vapeur compris. Avec 40 centrales construites en série et une production localisée, le coût unitaire peut être estimé à 800–1 200 dollars/kW.

- Coût d’une centrale de 2,5 GW : 2,0 à 3,0 milliards de dollars.
- Coût de 40 centrales : 80 à 120 milliards de dollars.

Cette estimation est encadrée par le coût bas observé pour des centrales géothermiques russes — environ 650 \$/kW d’après les données d’Itouroup — et le coût haut des projets complexes, autour de 1 500 \$/kW. Le calcul retient l’estimation haute de 100 GW pour la puissance totale du système géothermique autonome. La puissance réellement disponible ne pourra être évaluée qu’après la reconnaissance géologique et pourrait être bien moindre, jusqu’à quelques gigawatts seulement. Les fonds libérés seraient alors affectés à d’autres moyens de production.

9.5. Système de stockage d’énergie

Le stockage comporte trois niveaux :

9.5.1. Niveau primaire : stockage longue durée aux terminaux

Installé dans 40 terminaux, il stocke avec marge les 360 GWh nécessaires à un lancement. Technologies privilégiées aux prix actuels :

Type de stockage	Coût unitaire	Source
Stockage gravitaire	50 à 100 dollars/kWh	Retour d’expérience d’Energy Vault : 25 MW/100 MWh pour 7,7 millions de dollars, soit 77 dollars/kWh. Rendement de 75 à 85 % et durée de vie de 30 à 40 ans.
STEP et petite hydroélectricité fondées sur le canal magistral hydrothermal	80 à 150 dollars/kWh	Exploitation du dénivelé naturel le long du tracé.
BESS lithium-ion	125 dollars/kWh, installation complète	Selon Ember (2025) : 75 dollars/kWh pour les équipements chinois plus 50 dollars/kWh pour l’installation. À l’échelle de 215 GWh, le coût pourrait tomber à 100 dollars/kWh.

La capacité primaire totale est de 360 GWh, soit un cycle complet d’accélération. Pour un système composé à 70 % de stockage gravitaire/STEP et à 30 % de BESS, le coût est :

Composant	Capacité	Coût unitaire	Coût
Stockage gravitaire + STEP	250 GWh	60 dollars/kWh	15 milliards de dollars
BESS	110 GWh	125 dollars/kWh	13,75 milliards de dollars
Total niveau primaire	360 GWh		28,75 milliards de dollars

Fourchette avec incertitudes : 22 à 35 milliards de dollars.

9.5.2. Niveau secondaire : tampon près des bobinages et dans le tunnel

Les volants d’inertie, placés près des bobinages, lissent les régimes transitoires. Coût unitaire : 0,5 à 1 million de dollars/MWh ; une capacité tampon de 1 à 5 GWh coûte 0,5 à 5 milliards.

9.5.3. Niveau impulsif : stabilisation à la microseconde

Les **supercondensateurs compensent** uniquement les pulsations de quelques microsecondes et stabilisent la tension lors des variations brusques de charge. La capacité totale est inférieure à 1 % de l’énergie de lancement, soit 1 à 3 GWh. À 300–500 dollars/kWh, le coût est de 0,3 à 1,5 milliard.

9.5.4. Coût total du stockage

Niveau	Technologie	Capacité	Coût (milliards USD)
Primaire	Gravitaire + STEP + BESS	360 GWh	\$22–35
Tampon	Volants d’inertie	1 à 5 GWh	\$0.5–5
Impulsif	Supercondensateurs	1 à 3 GWh	\$0.3–1.5
Total stockage			\$22.8–41.5

9.6. Pôles industriels et logistique

Poste de coût	Coût (milliards USD)	Justification
Pôle industriel du Gabon : fabrication des navettes et modules de lancement	\$3–6	Docks de construction navale, usines et grues
Pôle industriel de République démocratique du Congo : portail atmosphérique et modules à grande vitesse	\$2–4	Pôle industriel de montagne et système d’électrolyse
Aménagement portuaire au Gabon et au lac Tanganyika	\$1–3	Quais, grues et entrepôts
Lignes électriques et routes le long des 2 050 km	\$4–8	Lignes 220 kV, routes et ponts
Canal magistral hydrothermal	\$2–5	Terrassement, revêtement et écluses
Total	\$12–26	

9.7. R&D et prototypage — Phase 0

Poste de coût	Fourchette (milliards USD)	Justification
Modélisation mathématique et CFD	\$0.01–0.03	Référence : développement de jumeaux numériques pour l’hyperloop, 4,5 millions CHF.
Reconnaissance géologique du tracé de 2 050 km	\$0.015–0.025	7 000 à 12 000 dollars/km pour une reconnaissance détaillée des zones difficiles d’accès.
Conception et documentation BIM	\$0.02–0.05	Cahiers des charges, avant-projets et études d’exécution.
Site d’essai du portail et des supraconducteurs	\$0.01–0.03	Banc d’essai d’une chambre de portail prototype et des modules de sustentation.
Création du consortium et accords juridiques	\$0.005–0.015	Négociations internationales, enregistrement et assurance.
Total Phase 0	\$0.06–0.15	

Le budget de R&D de 0,06 à 0,15 milliard de dollars n’est pas fixe. Des études plus poussées, un prototype de portail grandeur nature ou des bancs à grande échelle peuvent le porter à 0,5–3 milliards. La synthèse CAPEX retient donc 0,1–3 milliards et une médiane de 1,5 milliard.

9.8. Synthèse finale du CAPEX

Poste de coût	Fourchette (milliards USD)	Médiane (milliards USD)	Part du CAPEX (%)
Creusement des tunnels	\$77.4–124.8	\$101.1	41%
Parc et fabrication de tunneliers	\$2.64–4.84	\$3.74	1.5%
Système géothermique autonome : 40 centrales de 2,5 GW	\$80–120	\$100	40%

Poste de coût	Fourchette (milliards USD)	Médiane (milliards USD)	Part du CAPEX (%)
Stockage à trois niveaux	\$22.8–41.5	\$32.2	13%
Pôles industriels et logistique	\$12–26	\$19	8%
R&D, licences et administration	\$0,1–3	\$1.5	0.6%
Provision pour imprévus (15 %)	\$31–49	\$40	16%
CAPEX TOTAL	\$225–365	\$295	100%

Conclusion clé : le coût médian estimé de StarRoad est d’environ 300 milliards de dollars.

9.9. Répartition par phase (milliards USD)

Poste de coût	Phase 0	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5
Creusement des tunnels	—	—	\$5	\$20	\$70	\$6
Tunneliers	—	\$2	\$0.7	\$0.8	\$0.2	\$0.1
Système géothermique autonome d’énergie thermique	—	\$60	\$20	\$20	—	—
Stockage	—	\$10	\$10	\$8	\$3	\$1
Pôles industriels et logistique	—	\$5	\$3	\$3	\$5	\$3
R&D et licences	\$1.5	\$0.2	\$0.1	\$0.1	\$0.05	\$0.05
Provision (15 %)	\$0.23	\$11.6	\$5.8	\$7.8	\$11.7	\$1.5
TOTAL par phase	\$1.73	\$88.8	\$44.6	\$59.7	\$90	\$11.7
Total cumulé	\$1.73	\$90.5	\$135.1	\$194.8	\$284.8	\$296.5

9.10. Retour sur investissement et évolution du coût de transport

Toutes les données de cette sous-section sont strictement théoriques.

9.10.1. Évolution de la fréquence des lancements et du coût par kilogramme

StarRoad n’atteint pas instantanément sa pleine capacité. La fréquence des lancements et le coût d’acheminement évoluent à mesure que de nouvelles lignes entrent en service, que la flotte de navettes s’agrandit et que l’infrastructure orbitale se déploie.

Modèle d’évolution du coût d’acheminement vers l’orbite géostationnaire et au-delà, en dollars/kg :

Période	Lignes	Lancements par an	Fréquence	Coût d’acheminement (\$/kg)	Commentaire
Années 1–2, phase pilote	1	12–24	1 à 2 par mois	\$80–120	Premiers lancements commerciaux. Mise au point des opérations, frais généraux élevés et petite série.
Années 3–5	1	50–100	1 à 2 par semaine	\$30–50	Début de l’exploitation en série. La flotte passe à 3–5 navettes et les économies d’échelle réduisent les coûts.
Années 6–10	1	200–300	environ 1 par jour	\$10–20	La première ligne atteint sa capacité nominale et la maintenance est entièrement automatisée.
Années 11–15	2	500–700	environ 2 par jour	\$3–8	Mise en service de la deuxième ligne ; les coûts fixes sont répartis entre deux accélérateurs.
Années 16–25	3–4	1000+	3 à 5 par jour	\$0.8–3	Passage à 3–4 lignes parallèles. Des centrales solaires spatiales de plus de 1 GW fournissent l’énergie orbitale nécessaire aux manœuvres et au traitement des cargaisons.
Années 26 et suivantes	5+	1500+	5 à 10 par jour	\$0.3–1	Infrastructure arrivée à maturité. Les centrales spatiales alimentent l’accélérateur et les usines orbitales ; le coût marginal de l’énergie devient presque nul.

9.10.2. Calcul du coût d’un lancement (\$/kg)

Formule pour chaque période : Ckg = (Cénergie + Cmaintenance + Camortissement + Cexploitation) / Mcharge utile, où :

- Cénergie désigne le coût de l’électricité, y compris le refroidissement et les systèmes auxiliaires.
- Cmaintenance désigne l’entretien des navettes et de l’infrastructure.

- Camortissement désigne l'amortissement des dépenses d'investissement, soit 300 milliards de dollars sur 50 ans.
- Cexploitation regroupe les autres charges d'exploitation : personnel, logistique et assurance.
- Mcharge utile est la masse utile d'un lancement, soit 10 000 tonnes.

Paramètres finaux par période :

Période	Lancements/an	Énergie (\$/kg)	Maintenance (\$/kg)	Amortissement (\$/kg)	Exploitation (\$/kg)	Coût total (\$/kg)
Années 1–2	12	1.8	6.63	50	3.57	62
Années 3–5	50	1	1.25	12	0.67	14.92
Années 6–10	250	0.36	0.23	2.4	0.13	3.12
Années 11–15, 2 lignes	600	0.12	0.113	1	0.061	1.29
Années 16–25, 3–4 lignes	1200	0.045	0.049	0.5	0.026	0.62
Années 26 et suivantes, au moins 5 lignes et solaire spatial	2000	0.015	0.015	0.3	0.008	0.34

9.10.3. Structure du coût d'un lancement en valeur absolue

Pour une année moyenne de chaque période, avec une charge utile de 10 000 tonnes :

Période	Nombre de lancements	Énergie par lancement (millions USD)	Maintenance (millions USD)	Amortissement (millions USD)	Charges d'exploitation (millions USD)	Total par lancement (millions USD)
Années 1–2	12	18	66.3	500	35.7	620
Années 3–5	50	10	12.5	120	6.7	149.2
Années 6–10	250	3.6	2.34	24	1.26	31.2
Années 11–15	600	1.2	1.13	10	0.61	12.93
Années 16–25	1200	0.45	0.49	5	0.26	6.2
Années 26 et suivantes	>2000	0.15	0.146	3	0.079	3.38

9.10.4. Principales hypothèses de calcul

1. **Énergie** : prix de référence de 0,05 dollar/kWh durant les premières années ; à partir de la 26e année, il tombe à 0,005 dollar/kWh grâce aux centrales solaires spatiales et aux capacités géothermiques propres.
2. **Maintenance** : élevée pendant la phase pilote en raison des réparations, de la mise au point et d'effectifs surdimensionnés ; à l'horizon de la dixième année, elle devient une maintenance automatisée en chaîne.
3. **Amortissement** : 300 milliards de dollars de CAPEX répartis sur 50 ans représentent 6 milliards par an. Avec 250 lancements annuels, cela équivaut à 24 millions de dollars par lancement. Cette estimation prudente ne compense pas le CAPEX par les autres revenus. Autre lecture possible : les 6 milliards récupérés chaque année constituent un flux d'investissement croissant consacré à de nouvelles branches de StarRoad.
4. **Centrales solaires spatiales** : à partir de la seizième année, elles alimentent les usines orbitales et une partie de l'accélérateur, réduisent les coûts énergétiques et multiplient les recettes tirées de la vente d'énergie.

9.10.5. Dynamique intégrée : recettes et coût

Période	Lancements/an	Prix moyen du marché (\$/kg)	Recettes des lancements (milliards USD/an)	Coût (milliards USD/an)	Marge brute (milliards USD/an)
Années 1–2	12	\$100	12	7.44	4.56
Années 3–5	50	\$39	19.5	7.45	12.04
Années 6–10	250	\$9.6	24	7.8	16.2
Années 11–15	600	\$3.9	23.4	7.76	15.64
Années 16–25	1200	\$1.6	19.2	7.44	11.76

Période	Lancements/an	Prix moyen du marché (\$/kg)	Recettes desancements (milliards USD/an)	Coût (milliards USD/an)	Marge brute (milliards USD/an)
Années 26 et suivantes	2000	\$0.5	10	6.75	3.25

Remarque : les 35 à 44 milliards de dollars de recettes annuelles provenant de la vente d'énergie du système géothermique ne figurent pas dans ce tableau. Il s'agit d'un flux distinct qui couvre l'amortissement et les charges d'exploitation de l'infrastructure.

9.10.6. Conclusion sur l'évolution du coût

StarRoad débute avec un prix d'acheminement de 80 à 120 dollars/kg vers l'orbite géostationnaire et au-delà : déjà 10 à 15 fois moins que Falcon Heavy vers l'orbite basse, à 1 400 dollars/kg, et comparable à l'objectif de Starship, à 200 dollars/kg. Le prix tombe à 10 dollars/kg la dixième année, à 1 dollar/kg la vingt-cinquième et, vers la trentième année, à moins de 0,5 dollar/kg avec au moins cinq lignes et le soutien du solaire spatial. Les ressources spatiales, telles que l'énergie solaire et les métaux d'astéroïdes, deviennent alors accessibles à l'industrie terrestre.

Conclusion clé : StarRoad est compétitif dès la phase pilote. Le changement d'échelle et la synergie énergétique avec les centrales solaires spatiales réduisent progressivement le prix de deux ordres de grandeur en trente ans.

9.11. Comparaison avec les autres solutions

Projet	Type	Investissement (CAPEX / R&D)	Délai de retour	Coût / LCOE	Remarque
StarRoad, composante énergétique : système géothermique et stockage	Énergie	100 à 150 milliards de dollars	5 à 7 ans, grâce à la vente d'énergie	0,05 dollar/kWh	Production géothermique et stockage uniquement. Cette composante s'amortit comme une centrale autonome.
StarRoad, composante transport : tunnel, portail et navettes	Transport	150 à 200 milliards de dollars	8 à 12 ans, recettes du fret comprises	1 à 10 dollars/kg	Accélérateur, portail et navettes. Cette composante s'amortit grâce au fret mais utilise l'énergie de la première.
StarRoad, système complet	Énergie + transport	environ 300 milliards de dollars	8 à 12 ans, recettes cumulées	0,05 dollar/kWh et 1 à 10 dollars/kg	Projet intégré, avec des recettes issues de l'énergie et du fret.
Falcon Heavy, développement	Transport	environ 5 milliards de dollars en R&D	environ 10 à 15 ans à cadence commerciale	environ 1 400 dollars/kg	Fusée existante. Le CAPEX correspond ici au développement, pas à une infrastructure.
Starship, développement	Transport	environ 10 milliards de dollars en R&D	environ 10 à 15 ans si le marché visé se concrétise	objectif de 200 dollars/kg ; potentiel de 50 à 100 dollars/kg	En développement. L'investissement porte sur la R&D, pas sur une infrastructure permanente.
Grand Inga, centrale hydroélectrique en République démocratique du Congo	Énergie	80 à 100 milliards de dollars	15 à 25 ans	0,03 à 0,05 dollar/kWh	Grande centrale hydroélectrique ; énergie uniquement.
Grande centrale nucléaire, 2 réacteurs pour environ 2,4 GW	Énergie	15 à 20 milliards de dollars	20 à 30 ans	0,05 à 0,08 dollar/kWh	Centrale nucléaire type ; énergie uniquement.

9.12. Conclusion économique

Le modèle économique montre que StarRoad est réalisable, avec un CAPEX médian d'environ 300 milliards de dollars.

Les principaux facteurs sont les suivants :

- 1. Le système géothermique, estimé entre 80 et 120 milliards de dollars, est le composant le plus coûteux, mais il s'amortit comme un projet énergétique autonome en 5 à 7 ans.**
- 2. Le creusement des tunnels, estimé entre 77 et 125 milliards de dollars, est techniquement maîtrisable grâce à des tunneliers produits en série et à une fabrication interne.**
- 3. Le stockage, estimé entre 23 et 42 milliards de dollars, repose sur la baisse du prix des BESS à 125 dollars/kWh et sur des systèmes gravitaires conformes aux meilleures pratiques mondiales.**
- 4. La R&D, estimée entre 0,1 et 3 milliards de dollars, correspond au coût réel du prototypage, et non à celui d'une construction à pleine échelle.**

Attractivité économique : au prix de référence de 0,05 dollar/kWh, StarRoad génère 35 à 44 milliards de dollars par an par la seule vente d'énergie. Ces recettes couvrent les charges d'exploitation et permettent le retour sur investissement grâce aux exportations énergétiques avant même le début des lancements spatiaux à grande échelle.

10. Sécurité et modes de fonctionnement d'urgence

StarRoad est conçu selon un principe **extrême de continuité après défaillance** : la panne d'un élément, et souvent de plusieurs, ne provoque pas de catastrophe. La sécurité repose sur la redondance **physique, la séparation fonctionnelle et des protocoles multicouches** couvrant tout le cycle, de la préparation au vol.

10.1. Philosophie de sécurité : aucune panne isolée n'est fatale

- **Redondance des systèmes critiques.** Les éléments essentiels — réacteurs embarqués, alimentation des segments de l'accélérateur et couronnes de jets du portail — disposent d'une redondance triple ou quadruple.
- **Segmentation et isolement.** Le tunnel est divisé en sections autonomes de 50 à 200 km, dotées de leurs propres systèmes d'alimentation et de vide **et séparées par des obturateurs** mécaniques d'urgence. En cas de perte de vide dans une section voisine, ils ne se **ferment que si aucune navette ne s'y trouve**, afin d'éviter une défaillance en cascade.
- **Contrôle actif et passif de la sustentation.** Le système principal de stabilisation et de compensation des **déséquilibres** est embarqué. De puissantes boucles supraconductrices et unités de puissance redistribuent l'énergie en quelques microsecondes pour compenser les défaillances locales au sol. Dans les courbes à vitesse hypersonique, la section elliptique de la navette et la force centrifuge la stabilisent en outre contre la surface de guidage.
- **Priorité à la navette et à l'équipage.** En cas d'urgence pendant le lancement, les protocoles privilégient le sauvetage de la navette, même au prix de dommages locaux dans l'infrastructure du tunnel.

10.2. Principaux risques et dispositifs de protection

Risque	Cause	Dispositifs et protocole
Perte de sustentation ou asymétrie du champ à vitesse hypersonique	Défaillance d'un segment d'alimentation ou endommagement d'un bobinage.	1. Stabilisation embarquée à réponse nanoseconde. 2. Freinage inductif : à vitesse hypersonique , la navette induit elle-même un courant dans les bobinages passifs du tunnel, produisant un effet stabilisateur. 3. La segmentation confine le choc et les dégâts à une seule section.
Défaillance de la barrière gazodynamique du portail	Défaillance d'une ou plusieurs couronnes de jets.	1. Trois couronnes redondantes , chacune protégée contre les explosions . 2. Essai 60 secondes avant le lancement : formation du cône gazeux sans ouvrir l'obturateur principal ; les couronnes défectueuses sont isolées . 3. Alarm-1 annule le lancement à la moindre anomalie.
Perte du vide dans le tunnel	Dépressurisation consécutive à un accident ou à un dommage.	1. Réseau de capteurs de pression sur toute la longueur. 2. Obturateurs d'urgence entre sections pour confiner la fuite. 3. Déclenchement automatique d'Alarm-1 ou Alarm-2 si une dépressurisation est détectée devant la navette.
Panne détectée lorsqu'un arrêt n'est plus possible	Anomalie critique découverte dans les derniers 60 à 100 % du tracé d'accélération.	Alarm-3 : freinage maximal, jusqu'à 8g, pour réduire la vitesse. La priorité est de placer la navette sur une trajectoire suborbitale, même si le portail est perdu . La charge utile est larguée pour alléger le véhicule avant un amerrissage sûr.

10.3. Hiérarchie des protocoles d'urgence

- **Alarm-1, urgence avant lancement.** Déclenchée **avant le départ** en cas de perte de vide, d'anomalie du champ magnétique, de panne d'une couronne du portail ou de formation anormale du cône **gazeux**. Actions : annulation immédiate, isolement des sections défectueuses, diagnostic et réparation.
- **Alarm-2, urgence au début ou au milieu du tracé, 0 à 60 %.** Déclenchée **après** le départ si une anomalie est détectée plus loin. Actions : freinage d'urgence et arrêt dans le tunnel. Si le danger se trouve en aval, la navette revient au

départ par ses propres moyens. Sinon, elle est isolée dans sa section après l'arrêt ; la section est remise à l'air et équipage et passagers évacuent par le tunnel de **service et les puits** vers la surface.

- **Alarm-3, urgence en fin de tracé, 60 à 100 %. Déclenchée** lorsque l'arrêt dans le tunnel est impossible et qu'une panne du portail ou du dernier segment est probable. **Actions :**
 - 1) **Freinage d'urgence maximal, jusqu'à 8g**, pour réduire la vitesse.
 - 2) **Priorité à l'intégrité de la navette** ; le portail reste ouvert.
 - 3) **Insertion sur une trajectoire suborbitale** d'urgence et largage de la cargaison à l'apogée pour alléger le véhicule.
 - 4) **Amerrissage d'urgence** dans une zone prédéfinie de l'océan Indien ou Pacifique avec tous les systèmes principaux et de secours. La structure est conçue pour les surcharges et la destruction partielle du portail.

10.4. Dispositions structurelles de survie

- **Navette.** À terme, deux réacteurs embarqués indépendants ; système de sustentation supraconducteur distribué ; coque renforcée pour les surcharges extrêmes et le choc thermique.
- **Portail atmosphérique.** Trois moteurs annulaires indépendants sous enveloppes antidéflagrantes. Un obturateur mécanique résiste à l'onde de choc d'une barrière gazeuse partiellement rompue. Des ouvertures en entonnoir dans les parois internes évacuent instantanément la pression et conduisent passivement les gaz vers des chambres à vide de réserve. Elles limitent l'entrée d'air dans le tunnel et le portail, réduisent les dégâts même après une défaillance totale et empêchent l'impulsion de pression de la navette hypersonique de rompre la structure.
- **Tunnel.** Segmentation, obturateurs d'urgence, alimentation redondante et tunnel de service pour l'évacuation et la réparation.

10.5. Effets acoustiques et onde de choc

La sortie hypersonique produit un puissant bang sonique en onde N. L'essentiel de l'énergie se propage dans une bande étroite le long de la trajectoire, ce qui réduit l'effet sur les infrastructures proches du portail. Une zone sanitaire fermée est néanmoins établie ; son rayon est calculé par modélisation puis confirmé par des essais grandeur nature. Deux seuils de surpression maximale Δp définissent l'exposition admissible au sol :

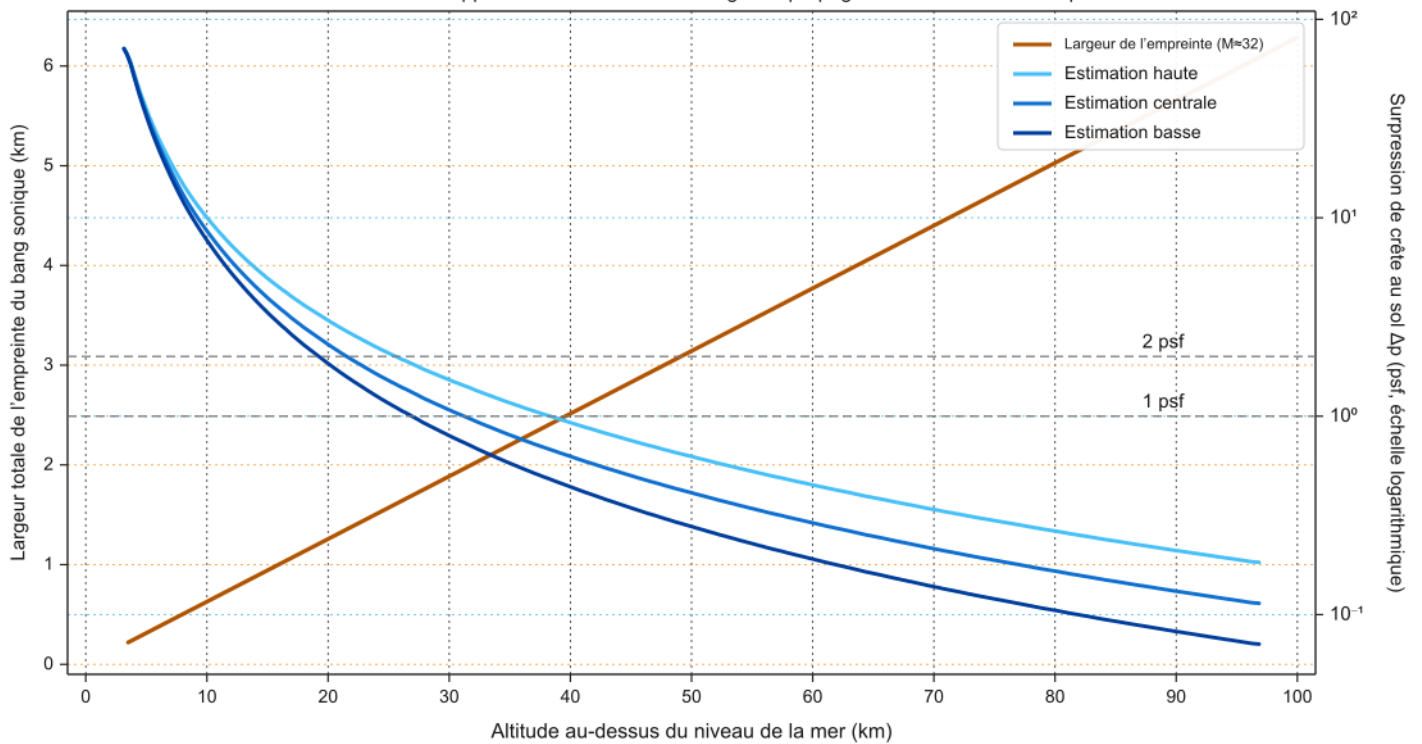
$\Delta p \leq 2 \text{ psf}$, soit environ 96 Pa : les dommages aux bâtiments et aux vitrages sont jugés improbables ;

$\Delta p \leq 1 \text{ psf}$, soit environ 48 Pa : objectif pour les zones habitées, avec un risque minimal de plaintes et aucun dommage. La géométrie et les limites d'exploitation — corridor d'exclusion, fenêtres météo et restrictions d'altitude — sont choisies avec une marge suffisante pour garantir ces seuils.

StarRoad : largeur de l'empreinte du bang sonique et surpression selon l'altitude

Plage estimée de Δp (étalonnée sur les données de la navette spatiale)

Tous les calculs supposent Mach $M \approx 32$ et un angle de propagation de l'onde de choc $\mu \approx 1.8^\circ$



Conclusion : la sécurité de StarRoad ne repose pas sur la croyance en l'absence de **panne**. Elle reconnaît tous les modes de **défaillance possibles et prévoit des réponses automatisées à l'avance**. Le projet devient ainsi une infrastructure étudiée, fiable et surtout digne de confiance, et non une simple ligne hypothétique.

11. Influence culturelle et psychologique

Au-delà de ses effets technologiques et économiques, StarRoad influencera profondément la culture et la conscience collective de l'humanité. Chaque lancement cessera d'être une simple opération technique pour devenir **un immense événement public, presque sacré**.

11.1. Le spectacle comme phénomène

La sortie hypersonique de la navette créera un phénomène astronomique artificiel unique : la Flèche solaire. Depuis une zone sûre, l'observateur verra un éclair instantané à l'horizon, puis l'ascension rapide d'une traînée de plasma éblouissante qui tracera une ligne droite dans le ciel. Quelques dizaines de secondes plus tard, ce ne sera pas le grondement familier de moteurs qui lui parviendra, mais un double bang supersonique assourdissant : la sensation physique d'une ville volante tout entière, et non d'une simple machine, franchissant les barrières sonique et thermique. Les lancements nocturnes éclaireront le paysage comme une comète en mouvement et évoqueront une aurore technologique contre nature.

11.2. Résonance psychologique et symbolique

- **Une échelle tangible.** Un programme spatial abstrait devient un spectacle quotidien ou hebdomadaire, visible à des centaines de kilomètres, qui transforme l'expansion spatiale, jusque-là résumée par des graphiques, en une **réalité physique du quotidien**.
- **Un nouvel archétype.** L'image d'une immense flèche lumineuse tirée par la Terre vers l'espace devient un puissant archétype du progrès, de la volonté et de l'aspiration. Dans la culture populaire, elle remplace la fusée verticale archaïque et symbolise le passage à l'ère **des corridors de transport spatial**.
- **Unité et fierté.** De même que les lancements de Soyouz et d'Apollo ont jadis rassemblé la planète devant les écrans de télévision, les vols réguliers de StarRoad deviennent des événements médiatiques mondiaux, témoignant de la capacité de l'humanité à coopérer pour atteindre des objectifs immenses.

11.3. Conséquences socioéconomiques

- **Tourisme. Des complexes d'observation** aménagés aux limites sûres de la zone d'exclusion deviennent les centres d'une nouvelle forme de tourisme spatial. Assister à un lancement pourrait être aussi recherché que visiter les merveilles du monde antique.
- **Élan éducatif. Le spectacle** devient un instrument sans égal pour susciter des vocations et incite des millions d'enfants à étudier la physique, l'ingénierie et l'astronautique.
- **Démystification de l'espace.** Le caractère régulier, prévisible et industriel des lancements retire au vol spatial son aura d'exception et de péril mortel, et le présente **comme une opération logistique normale, quoique** immense.

StarRoad créera donc non seulement l'infrastructure physique donnant accès à l'espace, mais aussi le **récit culturel et le socle émotionnel dont l'humanité a besoin** pour accepter son nouveau rôle : celui d'une civilisation qui construit activement son avenir au-delà de son berceau. L'apparition régulière de la Flèche solaire rappellera chaque jour que la route des étoiles n'est pas seulement ouverte, mais déjà empruntée.

12. Conclusion

StarRoad est plus qu'un mégaprojet d'ingénierie : c'est une stratégie de transition vers une civilisation spatiale industrielle. En remplaçant le paradigme de la « fusée » par celui de la « grande artère », le projet ouvre une voie pour surmonter les deux principaux obstacles : le coût d'accès et le faible débit de fret.

La voie hypersonique devient l'épine dorsale reliant énergie, agriculture, industrie, logistique et technologies spatiales. L'Afrique peut aussi accomplir un bond industriel et technologique en utilisant sa géographie et ses ressources pour construire une route vers l'espace au lieu de se limiter à exporter des matières premières.

En intégrant et en développant des technologies éprouvées, StarRoad fonde une économie dans laquelle les ressources du Système solaire deviennent accessibles pour résoudre les problèmes terrestres, tandis que l'infrastructure elle-même sert d'assurance et de tremplin pour l'avenir de l'humanité. Sa réalisation exigera une coopération internationale sans précédent, des investissements de long terme et une forte volonté d'ingénierie ; la récompense sera la clé d'une véritable ère spatiale, de ressources extraterrestres presque illimitées et d'une énergie abondante.