

Montée, Vol, Orbite

Un dirigeable électro-aérodynamique alimenté par énergie solaire pour un accès durable à l'espace

Vision et Fondements Physiques

Le rêve du vol a toujours été une compétition entre la patience et la puissance. Les premiers aérostats du XVIIIe siècle s'élevaient doucement dans le ciel en utilisant des gaz porteurs, tandis que les ingénieurs en fusées du XXe siècle le traversaient avec du feu. Les deux approches partagent le même objectif — échapper à la tyrannie de la gravité —, mais diffèrent radicalement en philosophie. L'une utilise l'air comme partenaire ; l'autre le traite comme un obstacle. Entre ces deux extrêmes se trouve une troisième voie, non encore réalisée en pratique mais plus impossible en principe : un **dirigeable alimenté par énergie solaire capable de voler jusqu'à l'orbite**, s'élevant d'abord par flottabilité, puis par portance aérodynamique, et enfin par soutien centrifuge, le tout sans propergol chimique.

Au cœur de ce concept se trouve la **propulsion électro-aérodynamique (EAD)** — une forme de poussée électrique qui utilise des champs électriques pour accélérer les ions dans l'air. Les ions accélérés transfèrent l'élan aux molécules neutres, produisant un écoulement de masse et une poussée nette sur les électrodes. Contrairement à une fusée, qui doit transporter une masse de réaction, ou à une hélice, qui nécessite des pales mobiles, la propulsion électro-aérodynamique fonctionne **sans pièces mobiles et sans échappement embarqué**, seulement avec la lumière du soleil et l'air. Couplée à un réseau solaire haute efficacité et montée sur un corps porteur grand et ultraléger, elle fournit l'ingrédient manquant pour une accélération soutenue dans la haute atmosphère, où la traînée est faible mais l'air encore présent.

La proposition est simple à décrire mais difficile à exécuter :

1. **Montée** — Un dirigeable flottant rempli d'hydrogène ou d'hélium monte passivement dans la stratosphère, loin du temps et du trafic aérien.
2. **Vol** — Le dirigeable accélère horizontalement en utilisant la poussée EAD, augmentant lentement la vitesse tout en grimpant dans un air plus raréfié pour réduire la traînée.
3. **Orbite** — Après des semaines d'accélération continue, la force centrifuge équilibre la gravité ; le véhicule n'a plus besoin de portance, devenant un satellite par persévérance plutôt que par explosion.

L'idée n'est pas un fantasme. Chaque étape est ancrée dans une physique connue : flottabilité, énergie solaire, électrostatique et mécanique orbitale. Ce qui change est l'échelle temporelle. Au lieu de minutes de combustion, nous considérons **des semaines de lu-**

mière solaire. Au lieu de tonnes de propergol, nous nous reposons sur **des champs et de la patience.**

L'Énergie de l'Orbite

Toute discussion sur les vols spatiaux commence et finit par l'énergie. L'énergie cinétique par kilogramme de masse requise pour maintenir une orbite circulaire autour de la Terre est donnée par

$$E_k = \frac{1}{2}v^2$$

où v est la vitesse orbitale. Pour une orbite terrestre basse, $v \approx 7.8 \times 10^3 \text{ m/s}$, donc $E_k \approx 3.0 \times 10^7 \text{ J/kg}$, ou environ **30 mégajoules par kilogramme**. C'est l'équivalent énergétique de brûler environ un kilogramme d'essence par kilogramme placé en orbite. C'est un grand nombre, mais pas astronomiquement grand.

Comparez maintenant cela au flux solaire continu au sommet de l'atmosphère terrestre : environ **1 360 watts par mètre carré**. Si nous pouvions convertir ne serait-ce qu'une petite fraction de cela en énergie cinétique sur des jours ou des semaines, nous pourrions, en principe, fournir l'énergie orbitale requise. Les réseaux photovoltaïques haute performance modernes ont des puissances spécifiques de l'ordre de plusieurs centaines de watts par kilogramme. À $P_{sp} = 300 \text{ W/kg}$, un kilogramme de réseau produit 300 joules par seconde. Sur une journée (8.64×10^4 secondes), cela fait 2.6×10^7 joules — comparable à l'énergie orbitale d'un kilogramme de masse.

Cette simple comparaison montre la logique de cette approche. L'énergie pour l'orbite est disponible du Soleil en environ **une journée par kilogramme de réseau**, si elle peut être convertie efficacement en poussée. Le défi pratique est que la traînée et les inefficacités absorbent la majeure partie. La solution est l'altitude et la patience : travailler dans l'air raréfié où la traînée est faible, et étendre le processus sur des semaines plutôt que des heures.

Échanger du Temps contre du Propergol

Les fusées résolvent le problème de la traînée par la force brute — elles vont si vite que l'air est irrelevant. Les dirigeables, en revanche, travaillent avec l'air ; ils peuvent s'attarder. Si le temps est traité comme une ressource jetable, il peut remplacer la masse de propergol. La tâche du dirigeable est de maintenir une accélération petite mais persistante sur de longues périodes, peut-être **de l'ordre de 10^{-3} m/s^2** , jusqu'à ce que la vitesse orbitale soit atteinte.

Si l'ascension vers l'orbite prend trois semaines, ou environ 1.8×10^6 secondes, l'accélération moyenne requise est

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{t} = \frac{7.8 \times 10^3}{1.8 \times 10^6} \approx 4.3 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$$

— moins de la moitié de mille de la gravité terrestre. De telles accélérations sont facilement tolérables pour un dirigeable ; elles n'imposent pas de contrainte structurelle. La

seule difficulté est de **la maintenir**, compte tenu de la petite quantité de poussée disponible par unité de puissance.

Si le véhicule a une masse de 10^3 kg , une accélération moyenne de $4 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$ ne nécessite que environ **4 newtons de poussée nette** — moins que le poids d'une pomme. L'absurdité apparente d'atteindre l'orbite avec la poussée d'une pomme disparaît lorsque le temps est autorisé à s'étendre sur des semaines.

Flottabilité et le Chemin vers l'Air Raréfié

Le dirigeable commence son voyage comme n'importe quel engin plus léger que l'air : en déplaçant l'air par un gaz plus léger. La force de flottabilité est donnée par

$$F_b = (\rho_{\text{air}} - \rho_{\text{gas}})gV$$

où V est le volume de gaz et ρ les densités respectives. Près du niveau de la mer, $\rho_{\text{air}} \approx 1.2 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{He}} \approx 0.18 \text{ kg/m}^3$, et $\rho_{\text{H}_2} \approx 0.09 \text{ kg/m}^3$. L'hydrogène fournit un peu plus de portance, environ **1,1 kg par mètre cube**, comparé à **1,0 kg par mètre cube** pour l'hélium. La différence semble petite mais s'accumule sur des milliers de mètres cubes.

L'hydrogène offre ainsi un avantage de performance mesurable, bien que au prix de l'inflammabilité. Il nécessite une zonage électrique stricte et des protocoles de ventilation, surtout que le véhicule porte aussi des systèmes électrostatiques haute tension. L'hélium offre moins de portance mais une inertie complète. Les deux gaz sont viables ; le choix dépend de la tolérance au risque de la mission. Pour les tests publics ou peuplés précoces, l'hélium est préférable. Pour les tentatives isolées ou orbitales, l'hydrogène peut être justifié.

À mesure que le véhicule monte, la densité de l'air diminue approximativement de manière exponentielle avec l'échelle de hauteur $H \approx 7.5 \text{ km}$. À 30 km, la densité est environ **1/65** du niveau de la mer ; à 50 km, **1/300**. La flottabilité s'affaiblit en conséquence, mais aussi la traînée. L'engin est conçu pour atteindre la **flottabilité neutre** à une altitude où l'intensité solaire reste élevée mais la pression dynamique minimale — environ 30–40 km dans la stratosphère. De là, commence l'accélération horizontale.

Portance, Traînée et Pression Dynamique

Pour maintenir l'altitude pendant l'accélération, le dirigeable peut s'appuyer partiellement sur la **portance aérodynamique**. Pour une coque de corps porteur, les forces de portance et de traînée sont

$$F_L = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_L, \quad F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_D$$

où A est l'aire de référence, C_L et C_D les coefficients de portance et de traînée. Comme ρ est petite en altitude, ces forces sont petites ; le véhicule compense en ayant **une grande aire** et **un faible poids**.

Le rapport $L/D = C_L/C_D$ détermine l'efficacité du vol aérodynamique. Les planeurs modernes peuvent dépasser $L/D = 50$ dans l'air dense. Un dirigeable ultraléger conçu avec une douceur extrême et des appendices minimaux pourrait plausablement maintenir un L/D effectif de 10–20 même dans l'air raréfié. Mais à mesure que l'air s'amenuise davantage, la transition vers le vol orbital n'est pas limitée par la portance — elle est gouvernée par la **puissance de traînée**.

La puissance nécessaire pour surmonter la traînée est

$$P_D = F_D v = \frac{1}{2} \rho v^3 A C_D$$

et elle scale avec le cube de la vitesse. C'est pourquoi les fusées accélèrent rapidement : si elles s'attardent, la traînée consomme leur énergie de manière exponentielle. Le dirigeable prend la route opposée : il accélère où ρ est si petite que P_D reste bornée même à des kilomètres par seconde.

Si, par exemple, $\rho = 10^{-5} \text{ kg/m}^3$ (typique près de 60 km d'altitude), $A = 100 \text{ m}^2$, $C_D = 0.05$, et $v = 1.000 \text{ m/s}$, alors

$$P_D = 0.5 \times 10^{-5} \times (10^3)^3 \times 100 \times 0.05 = 2.5 \times 10^4 \text{ W},$$

ou 25 kW — facilement à portée solaire. En contraste, à niveau de la mer, la même configuration nécessiterait 25 gigawatts.

La règle est simple : **l'air raréfié achète du temps, et le temps remplace le propergol.**

L'Opportunité Électro-Aérodynamique

Au début du XXe siècle, les physiciens observèrent que des champs électriques forts près d'électrodes pointues dans l'air produisent une faible couronne bleue et un écoulement d'air subtil. Ce « vent électrique » résulte du transfert d'élan entre ions et neutres. Il fut traité principalement comme une curiosité jusqu'à ce que l'électronique haute tension mûrisse. Quand arrangé correctement, l'effet peut produire une poussée mesurable.

La propulsion électro-aérodynamique fonctionne en appliquant une haute tension entre un **émetteur**, un fil fin ou un bord qui produit des ions, et un **collecteur**, une électrode plus large qui les reçoit. Les ions s'accélèrent dans le champ électrique, entrent en collision avec des molécules d'air neutres, et impartent un élan vers l'avant au gaz. L'appareil ressent une poussée égale et opposée.

Bien que les démonstrations précoces fussent modestes, des expériences récentes — y compris un **avion ionique à aile fixe** volé par le MIT en 2018 — ont prouvé que le vol stable et silencieux est possible. Pourtant, l'idée précède ce jalon. Des années plus tôt, des recherches sur des **formulations basées sur le tenseur de Maxwell** de la poussée électro-aérodynamique ont montré comment la même physique pourrait s'étendre à des géométries plus grandes et un air plus raréfié. Dans ce formalisme, la poussée naît non du « vent » mais d'un **stress électromagnétique** intégré sur le volume de la région de décharge.

L'équation pertinente est dérivée du **tenseur de contrainte de Maxwell \mathbf{T}** , qui pour un champ électrostatique est

$$\mathbf{T} = \varepsilon (\mathbf{E}\mathbf{E} - \frac{1}{2}E^2\mathbf{I})$$

où ε est la permittivité du milieu, \mathbf{E} le vecteur de champ électrique, et \mathbf{I} le tenseur identité. La force électromagnétique nette sur un corps est obtenue en intégrant ce tenseur sur sa surface :

$$\mathbf{F}_{EM} = \oint_{\partial V} \mathbf{T} \cdot \mathbf{n} dS.$$

Dans la région ionisée, cela se simplifie en une **densité de force volumique**

$$\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E} - \frac{1}{2}E^2 \nabla \varepsilon,$$

où ρ_e est la densité de charge locale. Dans un gaz d'une permittivité approximativement uniforme, le second terme s'annule, laissant l'élégante **force corporelle de Coulomb**

$$\mathbf{f} \approx \rho_e \mathbf{E}.$$

Cette expression compacte est l'essence de la propulsion électro-aérodynamique : partout où un champ électrique et une charge spatiale coexistent, une force corporelle nette agit sur le milieu.

Les ions eux-mêmes sont peu nombreux, mais leur élan est relayé aux neutres par des collisions. Le chemin libre moyen λ entre collisions détermine comment l'élan se diffuse ; il scale inversement avec la pression. À des pressions plus basses, les ions voyagent plus loin par collision, et l'efficacité du transfert d'élan change. Il existe une **bande de pression optimale** où les ions peuvent encore entrer en collision assez fréquemment pour pousser le gaz mais pas si fréquemment qu'ils gaspillent de l'énergie en le chauffant. Pour l'atmosphère terrestre, cette bande se situe approximativement entre quelques torr et quelques millitorrs — exactement la plage rencontrée entre 40 et 80 kilomètres d'altitude.

L'enveloppe du dirigeable devient ainsi l'hôte idéal pour des tuiles électro-aérodynamiques opérant dans leur environnement naturel. L'atmosphère elle-même est la masse de réaction.

La Physique de la Propulsion Électro-Aérodynamique

À première vue, la propulsion électro-aérodynamique semble improbable. L'idée qu'un ensemble silencieux et immobile d'électrodes puisse générer une poussée assez forte pour déplacer un dirigeable semble en désaccord avec l'expérience quotidienne. L'absence de masse de réaction visible ou de machinerie mobile défie l'intuition. Pourtant, chaque ion qui dérive dans un champ électrique porte de l'élan, et l'élan est conservé. Le champ agit comme un levier invisible, et l'air comme son fluide de travail.

Les fondements de ce phénomène reposent non sur une physique de plasma exotique mais sur les **équations de Maxwell** et leur expression mécanique, le **tenseur de**

contrainte de Maxwell. Cette formulation tensorielle rend clair que les champs électriques ne sont pas seulement des motifs de potentiel — ils stockent et transmettent un stress mécanique dans le milieu environnant.

Stress de Champ et la Force Corporelle de Coulomb

Le **tenseur de contrainte de Maxwell** en électrostatique est

$$\mathbf{T} = \varepsilon (\mathbf{E}\mathbf{E} - \frac{1}{2} E^2 \mathbf{I})$$

où ε est la permittivité, \mathbf{E} le champ électrique, et \mathbf{I} le tenseur identité. Le premier terme représente la pression directionnelle le long des lignes de champ, et le second terme la tension isotrope résistant à la divergence du champ.

La **force électromagnétique nette** sur un corps immergé dans un tel champ est l'intégrale de surface de ce tenseur :

$$\mathbf{F}_{EM} = \oint_{\partial V} \mathbf{T} \cdot \mathbf{n} dS.$$

Physiquement, cette expression nous dit que le champ électrique exerce un stress sur les frontières de toute région contenant une charge ou des gradients diélectriques. Mais elle peut être réécrite sous une forme plus locale et volumique en utilisant le théorème de divergence :

$$\mathbf{f} = \nabla \cdot \mathbf{T} = \rho_e \mathbf{E} - \frac{1}{2} E^2 \nabla \varepsilon.$$

Le premier terme, $\rho_e \mathbf{E}$, est la familière **force corporelle de Coulomb** : une densité de charge subissant un champ. Le second terme n'importe que là où la permittivité du milieu change rapidement, comme aux frontières de matériaux. Dans l'air, ε est essentiellement uniforme, donc $\nabla \varepsilon \approx \mathbf{0}$, laissant

$$\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E}.$$

Cette équation trompeusement simple encode tout le principe de la propulsion électro-aérodynamique. Si un volume de gaz existe dans lequel des ions (de densité ρ_e) subissent un champ électrique \mathbf{E} , alors une **densité de force nette** agit sur ce gaz. La magnitude de la poussée totale est l'intégrale volumique de $\rho_e \mathbf{E}$ sur la région de décharge :

$$\mathbf{F} = \int_V \rho_e \mathbf{E} dV.$$

Les électrodes ressentent la réaction égale et opposée, produisant une poussée.

Transfert d'Élan et le Rôle des Collisions

Les ions dans l'air voyagent rarement loin avant d'entrer en collision avec des molécules neutres. Le **chemin libre moyen** λ est inversement proportionnel à la pression du gaz p et à la section efficace σ :

$$\lambda \approx \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p}$$

où d est le diamètre moléculaire. Au niveau de la mer, λ est minuscule — de l'ordre de dizaines de nanomètres. Dans la mésosphère (autour de 70 km), λ s'étend à des millimètres ou centimètres.

Quand un ion s'accélère sous le champ, il transfère l'élan aux neutres par des collisions. Chaque collision partage une fraction de l'élan dirigé de l'ion ; l'effet cumulatif est un **écoulement neutre de masse** — ce que les expérimentateurs appellent *vent ionique*. Le gaz se déplace de l'émetteur au collecteur, et les électrodes subissent une poussée de réaction opposée.

Dans un air très dense, les ions entrent en collision trop souvent ; leur vitesse de dérive se sature, et l'énergie est perdue sous forme de chaleur. Dans un air extrêmement raréfié, les collisions sont trop rares ; les ions volent librement mais n'entraînent pas efficacement les neutres. Entre ces extrêmes se trouve un **point doux** où le chemin libre moyen permet un transfert d'élan efficace — précisément la région que le dirigeable traverse sur son chemin vers l'espace.

À des pressions d'environ 10^{-2} à 10^{-4} bar (correspondant à 40–80 km d'altitude), les ions peuvent s'accélérer sur des distances macroscopiques avant de collisionner, mais les collisions se produisent encore assez fréquemment pour produire une poussée. Le **couplage électro-aérodynamique** entre champ et gaz est à son optimum.

La Relation Puissance–Poussée

La puissance électrique délivrée à une décharge est $P = \int_V \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} dV$, qui est approximativement IV pour un courant constant I et une tension V . La sortie mécanique utile est la poussée multipliée par la vitesse de la masse d'air accélérée, mais en propulsion stationnaire, nous nous intéressons principalement au **rapport poussée-puissance**, T/P .

Des études empiriques ont rapporté des valeurs de T/P allant de quelques milli-newtons par watt (**mN/W**) à près de **0.1 N/W** sous conditions optimisées. Dans l'air atmosphérique à pression standard, l'EAD est inefficace ; mais à des pressions réduites, la mobilité ionique augmente et la densité de courant peut être maintenue à des tensions plus basses, améliorant T/P .

Un argument dimensionnel simple relie la densité de force corporelle $f = \rho_e \mathbf{E}$ à la densité de courant $\mathbf{J} = \rho_e \mu \mathbf{E}$, où μ est la mobilité ionique. Alors

$$f = \frac{J}{\mu},$$

de sorte que pour une densité de courant donnée, une mobilité plus élevée (obtenue à pression plus basse) donne plus de poussée par courant. La puissance électrique totale est $P = JEV$, donc le **rapport poussée-puissance** scale comme

$$\frac{T}{P} \approx \frac{1}{E\mu},$$

impliquant que des champs électriques plus faibles ou une mobilité ionique plus élevée augmentent l'efficacité. Mais un E plus faible réduit aussi le courant et donc la poussée to-

tale, il y a donc à nouveau un régime optimal.

Ces relations ne sont pas des curiosités théoriques — elles déterminent le design de chaque tuile EAD. À une altitude donnée, la tension, l'espacement des gaps et la géométrie de l'émetteur doivent être ajustés pour que la **courbe de Paschen** (qui relie la tension de claquage au produit pression-distance) soit satisfaite mais non dépassée.

La loi de Paschen pour l'air peut être exprimée approximativement comme

$$V_b = \frac{Bpd}{\ln(Apd) - \ln[\ln(1+1/\gamma_{se})]}$$

où A et B sont des constantes empiriques et γ_{se} le coefficient d'émission d'électrons secondaires. La géométrie variable du dirigeable permet d'ajuster dynamiquement d , l'espacement des électrodes, pour maintenir une décharge corona efficace sans arc à mesure que la pression ambiante diminue pendant l'ascension.

Géométrie de Champ et Topologie de Stress

Les démonstrations précoces de « lifters » utilisaient un fil fin comme émetteur et une feuille plate comme collecteur. Les lignes de champ étaient fortement courbées, et la plupart de l'énergie allait au maintien de la corona plutôt qu'à produire une poussée utile. L'efficacité était pauvre parce que le **champ de stress de Maxwell** n'était pas aligné avec la direction de poussée désirée.

L'intuition clé — développée dans un travail théorique précédant l'ionoplane du MIT — était de traiter le champ électrique non comme un sous-produit mais comme la variable de design primaire. La poussée naît de l'**intégrale du stress électromagnétique** le long des lignes de champ, donc l'objectif est de façonner ces lignes pour qu'elles soient parallèles et cohérentes sur une large région. L'analogie est aérodynamique : comme un écoulement laminaire lisse minimise la traînée, une topologie de champ électrostatique lisse maximise le stress dirigé.

Cette « ingénierie de topologie de champ » reformule l'appareil comme un *actionneur électrostatique* plutôt qu'un jouet plasma. En contrôlant la courbure des électrodes, les potentiels de garde et les couches diélectriques, on peut rendre \mathbf{E} presque uniforme sur le chemin d'accélération, produisant un stress quasi-linéaire et évitant l'auto-focalisation destructrice qui cause des arcs.

La conséquence est l'évolutivité. Quand les électrodes sont tessellées en tuiles de mètre carré, chacune avec son propre convertisseur haute tension et logique de contrôle, toute l'enveloppe du dirigeable peut être transformée en un immense réseau EAD distribué. Il n'y a pas de pièces mobiles à synchroniser, seulement des champs à coordonner.

Densité de Poussée et le Chemin vers l'Évolutivité

La densité de force corporelle volumique est $\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E}$. La densité de charge dans une décharge corona typique à pression atmosphérique est de l'ordre de 10^{-5} à 10^{-3} C/m³. À

pression réduite, elle peut diminuer quelque peu, mais le champ électrique E peut être augmenté en sécurité à des dizaines de kilovolts par centimètre sans claquage.

Si $\rho_e = 10^{-4} \text{ C/m}^3$ et $E = 10^5 \text{ V/m}$, la densité de force est $f = 10 \text{ N/m}^3$. Étendue sur une région active de 1 m d'épaisseur, cela donne une pression surfacique de 10 N/m^2 — équivalente à quelques millipascals. Cela peut sembler petit, mais sur des milliers de mètres carrés, cela devient significatif. Une surface de 1000 m^2 avec un stress de 10 N/m^2 produit $10\,000 \text{ N}$ de poussée, assez pour accélérer un véhicule multi-tonnes à des niveaux milli-g — précisément le régime requis pour un relèvement orbital sur des semaines.

De telles estimations illustrent pourquoi l'EAD, malgré sa faible densité de puissance, devient faisable pour des **structures grandes et légères** dans l'air raréfié. Contrairement à une tuyère de fusée, qui gagne en efficacité seulement quand la densité de puissance est élevée, l'EAD gagne un avantage de l'aire. L'enveloppe du dirigeable fournit une aire abondante ; la transformer en surface active est un couplage naturel.

La Zone Douce de la Haute Atmosphère

Tout système physique a une niche opérationnelle. Pour la propulsion EAD, le meilleur régime est où la pression de gaz est assez basse pour permettre des hautes tensions et de longs chemins libres moyens ioniques, mais pas si basse que le plasma devienne sans collision.

En dessous d'environ 20 km, l'atmosphère est trop dense : mobilité ionique faible, tensions de claquage élevées, et énergie gaspillée en chauffant le gaz. Au-dessus d'environ 100 km, l'air devient trop raréfié : l'ionisation ne peut être maintenue continuellement, et la masse de réaction neutre disparaît. Entre environ 40 et 80 km se trouve une **bande de transition** — la mésosphère inférieure —, où la propulsion EAD peut produire ses meilleurs rapports poussée-puissance.

Par chance, c'est aussi la plage d'altitude où la puissance solaire reste presque non atténuée et la traînée aérodynamique est des ordres de grandeur plus petite qu'au niveau de la mer. C'est une fenêtre étroite mais tolérante, un couloir naturel pour un nouveau type de véhicule : ni avion ni fusée, mais quelque chose qui vit dans le chevauchement entre eux.

Efficacité et Flux d'Énergie

À tout instant, la puissance électrique d'entrée P est divisée en :

1. **Puissance de poussée mécanique utile** $P_T = T v_{\text{eff}}$, où v_{eff} est la vitesse d'échappement effective de l'écoulement d'air.
2. **Pertes d'ionisation** P_i , l'énergie requise pour maintenir le plasma.
3. **Pertes résistives** P_r , dues au chauffage ohmique et aux fuites.
4. **Pertes radiatives** P_γ , émises sous forme de lumière (l'éclat corona familier).

L'efficacité globale est $\eta = P_T/P$. Les expériences suggèrent que η peut atteindre quelques pourcents dans l'air dense et potentiellement des dizaines de pourcents en opé-

ration basse pression optimisée. Bien que modeste, ces nombres sont adéquats pour un système solaire opérant sur de longues durées, où l'efficacité peut être échangée contre le temps.

Contrairement à la propulsion chimique, qui doit atteindre une haute efficacité par seconde pour minimiser le carburant, un dirigeable EAD solaire peut se permettre l'inefficacité s'il peut **opérer indéfiniment**. La mesure du succès n'est pas l'impulsion spécifique mais la **patience spécifique** : joules accumulés sur des jours.

Du Stress de Maxwell à la Poussée Macroscopique

Pour illustrer la connexion entre théorie de champ et expérience quotidienne, considérez le condensateur à plaques parallèles dans le vide. La pression entre les plaques est $p = \frac{1}{2}\epsilon_0 E^2$. Si $E = 10^6 \text{ V/m}$, alors $p \approx 4.4 \text{ N/m}^2$. Multipliez par l'aire, et vous obtenez la force mécanique requise pour séparer les plaques. Le stress électrostatique est littéralement une pression mécanique.

La propulsion EAD remplace une plaque par l'atmosphère elle-même. Les ions sont le milieu par lequel le stress du champ est transmis. Au lieu de pression statique, nous obtenons un écoulement directionnel. L'équation $\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E}$ est l'analogie dynamique de cette pression statique du condensateur.

Quand sommée sur la surface du dirigeable, le stress intégré devient un vecteur de poussée net, tout comme la pression intégrée sur la surface d'une aile produit de la portance. L'analogie est profonde : la portance aérodynamique est le flux d'élan de l'air dévié par une surface ; la poussée EAD est le flux d'élan des ions accélérés par un champ.

L'Ionoplane du MIT et Preuve Expérimentale

Pendant des décennies, les sceptiques ont rejeté l'EAD comme une curiosité de laboratoire. Puis, en 2018, un petit avion à aile fixe construit par le MIT a démontré un **vol stationnaire sans hélice** alimenté uniquement par poussée électro-aérodynamique. L'« ionoplane » pesait environ 2,5 kilogrammes et a volé des dizaines de mètres sous alimentation par batterie. Son rapport poussée-poids était petit, mais l'accomplissement historique : le premier véhicule plus lourd que l'air maintenu en vol par propulsion ionique.

Crucialement, la théorie et le travail conceptuel menant à cette démonstration étaient déjà en développement indépendant. Le cadre théorique présenté dans *Propulsion Electro-Aérodynamique* (voir https://farid.ps/articles/electroaerodynamic_propulsion/en.html) décrivait le même mécanisme en termes de **stress de Maxwell** et de **force corporelle de Coulomb** des années plus tôt, en mettant l'accent sur la topologie de champ et l'évolutivité plutôt que sur la chimie corona.

L'ionoplane du MIT a prouvé la praticabilité de l'effet dans l'air dense. Le projet Rise-Fly-Orbit vise à l'étendre à l'air raréfié, où la physique devient encore plus favorable. Si un petit avion peut voler à 1 bar, un dirigeable solaire peut voler à l'orbite à microbars, avec assez de patience et de lumière solaire.

La Vertu de la Simplicité

La propulsion EAD est élégante conceptuellement : sans pièces mobiles, sans combustion, sans échappement haute vitesse, sans cryogénie. Ses composants sont robustes par nature — électrodes, diélectriques, convertisseurs de puissance et peaux photovoltaïques. Le système scale naturellement avec l'aire, non avec la masse.

Le défi technique se déplace de la thermodynamique à l'**ingénierie électrique et science des matériaux** : prévenir l'érosion corona, gérer les fuites de charge et maintenir l'isolation haute tension dans des pressions variables. Ces sont solubles avec des matériaux et microélectronique modernes.

Parce que le mécanisme EAD dépend seulement de la géométrie de champ et de la mobilité ionique, il est **inhérentement modulaire**. Chaque mètre carré de la peau du dirigeable peut être traité comme une tuile avec T/P et caractéristiques de tension connues. La poussée totale du véhicule est la somme vectorielle de milliers de tuiles indépendantes. Cette modularité permet une dégradation gracieuse — la panne de quelques modules ne compromet pas l'ensemble de l'engin.

Le Dirigeable Électro-Aérodynamique comme Système

Quand couplé à l'énergie solaire, la propulsion EAD devient non seulement une source de poussée mais un **système climatique** pour le véhicule. Les mêmes champs qui génèrent la poussée ionisent aussi les gaz traces, réduisent la charge de surface et influencent potentiellement les propriétés de la couche limite. Le champ électrique peut même servir de « voile électrostatique » tunable, interagissant faiblement avec le champ magnétique terrestre ou le plasma ambiant dans la haute atmosphère.

À long terme, on peut imaginer un contrôle actif de la traînée en manipulant les distributions de charge de surface — un **bouclier de traînée électrodynamique** qui varie le stress de champ local pour ajuster la trajectoire de vol sans surfaces de contrôle mécaniques.

Ces possibilités élèvent la propulsion EAD au-delà d'une curiosité dans le royaume d'une technologie de contrôle de vol à état solide de but général — applicable partout où des gaz ou plasmas peuvent être polarisés et accélérés par des champs électriques.

Architecture d'Ingénierie et Dynamique de Vol

L'avantage fondamental du concept Rise-Fly-Orbit réside non dans des matériaux exotiques ou une physique révolutionnaire, mais dans le **réordonnement de principes familiers**. Flottabilité, énergie solaire et électrostatique sont tous bien compris. Ce qui est nouveau est la façon dont ils sont séquencés en un continuum unique : *une ascension sans moment de discontinuité*.

Les fusées passent par des régimes distincts — lancement, épuisement, côte, orbite. Le dirigeable électro-aérodynamique, en revanche, n'expérimente que des transitions gra-

duelles. Il monte par légèreté, vole par portance et orbite par inertie. Chaque étape se fonde dans la suivante, gouvernée par le même interplay stable de forces de flottabilité, aérodynamiques et électrostatiques.

L'Enveloppe : Structure comme Atmosphère

L'enveloppe du dirigeable doit satisfaire des demandes contradictoires : elle doit être **légère et forte, conductrice et isolante, transparente à la lumière solaire mais résistante à la radiation**. Ces sont réconciliables par construction en couches.

La couche extérieure peut être un **polymère métallisé** — par exemple, un film fin de Kapton aluminisé ou de polyéthylène téréphtalate. Cette couche fournit un blindage UV et sert de surface d'électrode partielle pour les tuiles EAD. En dessous se trouve une **couche diélectrique** qui prévient les décharges indésirables et définit l'écart au collecteur intérieur. La structure intérieure est un réseau de membranes tendues et de longerons qui maintiennent la géométrie globale à une surpression interne petite, de l'ordre de $\Delta p \approx 300 \text{ Pa}$ — seulement quelques millièmes de pression atmosphérique.

Cette surpression suffit à garder l'enveloppe tendue mais pas assez pour causer une masse structurelle significative. En effet, tout le véhicule est un immense condensateur léger, sa peau chargée et vivante de lignes de champ.

Le volume interne est rempli d'un gaz porteur — hydrogène ou hélium. Comme la surpression requise est petite, les demandes de charge sur le matériau sont modestes. Le principal défi est la perméabilité au gaz et la dégradation UV sur de longues missions, tous deux abordables avec des revêtements et films multicouches modernes.

Hydrogène ou Hélium

Le choix de gaz façonne la personnalité du véhicule.

L'**hydrogène** offre la plus grande portance, fournissant environ 10 % de flottabilité en plus que l'hélium. Cette différence devient substantielle quand le volume total atteint des millions de mètres cubes. L'hydrogène est aussi plus facile à sourcer et peut même être généré in situ par électrolyse solaire de l'eau. Son désavantage, bien sûr, est l'inflammabilité.

La présence d'électrostatique haute tension rend la gestion de l'hydrogène non triviale. La sécurité dépend d'une compartimentation méticuleuse, d'un blindage électrostatique et de ventilation. Les modules EAD eux-mêmes sont scellés et séparés des cellules de gaz par des barrières diélectriques, et les différences de potentiel à travers la coque sont minimisées par distribution de charge symétrique.

L'**hélium**, en contraste, est inerte et sûr mais fournit moins de portance et un coût plus élevé. Son principal inconvénient est la rareté ; une utilisation à grande échelle pourrait tendre l'approvisionnement. Pour les véhicules de test précoces et les vols de démonstration publics, l'hélium est le choix prudent. Pour des tentatives orbitales opérationnelles dans des couloirs isolés, l'hydrogène peut être justifié par performance et coût.

De toute façon, le design de l'enveloppe est largement compatible ; seulement les systèmes de manipulation de gaz et de sécurité diffèrent.

Énergie Solaire et Gestion d'Énergie

Le Soleil est le moteur de l'engin. Chaque watt d'énergie électrique commence comme lumière solaire absorbée par la peau photovoltaïque.

Des photovoltaïques haute efficacité et ultralégers — films minces de gallium-arséniure ou composites de pérovskite laminés sur la surface du dirigeable — peuvent atteindre des puissances spécifiques approchant **300–400 W/kg**. Les réseaux sont arrangés conformément pour maintenir une douceur aérodynamique. La gestion de puissance est distribuée : chaque section de panneau alimente un traqueur de point de puissance maximale local (MPPT) qui régule la tension vers le bus haute tension alimentant les tuiles EAD.

Puisque le véhicule expérimente des cycles jour-nuit, il porte un **tampon d'énergie modeste** — batteries légères ou supercondensateurs — pour soutenir des opérations de bas niveau pendant l'obscurité. Mais ces ne sont pas grands ; la philosophie de design du système est **propulsion solaire directe**, non énergie stockée. À des altitudes orbitales, l'engin peut poursuivre la lumière solaire presque continuellement, ne plongeant dans l'éclipse que brièvement.

Le contrôle thermique est géré radiativement. Avec une convection négligeable en haute altitude, le rejet de chaleur repose sur des **surfaces à haute émissivité** et des chemins de conduction vers des radiateurs. Heureusement, le processus EAD est relativement frais — pas de combustion — et la charge thermique principale vient de la lumière solaire absorbée.

Les Tuiles Electro-Aérodynamiques

Chaque mètre carré de l'enveloppe fonctionne comme une **tuile EAD** — une cellule de propulsion auto-contenue comprenant un émetteur, un collecteur et un petit circuit de contrôle. L'émetteur peut être une grille fine de pointes ou de fils aiguisés à haut potentiel positif, tandis que le collecteur est un maillage large maintenu près de la terre ou à potentiel négatif. L'espace entre est une région de décharge contrôlée.

Quand énergisée, la tuile établit un champ électrique \mathbf{E} , génère une densité de charge ρ_e , et produit une poussée locale $\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E}$ dirigée tangentiellement le long de la surface. En modulant les tensions sur différentes tuiles, le dirigeable peut diriger, cabrer et rouler sans pièces mobiles.

La géométrie adaptative est clé. À mesure que la pression ambiante diminue avec l'altitude, le chemin libre moyen augmente. Pour maintenir une décharge efficace, l'espacement de gap effectif d entre émetteur et collecteur doit augmenter approximativement en proportion à $1/p$. Cela peut être réalisé avec des **séparateurs diélectriques flexibles et gonflables** qui s'étendent légèrement quand la pression externe chute, ou avec une **modulation électronique** de gradients de potentiel pour émuler de plus grands gaps.

Chaque tuile rapporte une télémétrie — courant, tension, compteurs d'arc — à un contrôleur central. Si une tuile subit un arc ou une dégradation, elle est éteinte et contournée. Le design modulaire signifie que la perte de tuiles individuelles affecte à peine la poussée totale.

De la Flottabilité à la Poussée

Le vol commence doucement. Au lancement, le dirigeable monte par flottabilité dans la stratosphère. Pendant l'ascension, le système EAD opère en mode basse puissance, fournissant une poussée mineure pour stabilisation et contrôle de dérive.

À environ 30–40 km d'altitude, où l'air est raréfié mais encore collisionnel, commence l'accélération principale. Le dirigeable vire progressivement vers un vol horizontal, orientant son axe long dans la direction de mouvement orbital prévue.

Initialement, la poussée est équilibrée entre accélération horizontale et augmentation de portance. La flottabilité résiduelle du véhicule compense beaucoup de son poids ; la poussée EAD fournit à la fois des composantes avant et légèrement ascendantes. À mesure que la vitesse augmente, la portance dynamique croît et la flottabilité devient négligeable. La transition est douce — il n'y a pas de « moment de décollage » car le dirigeable n'était jamais assis sur une piste.

L'Ascension de Trois Semaines

Considérez une masse de véhicule représentative de $m = 2000 \text{ kg}$. Pour atteindre une vitesse orbitale de $v = 7.8 \times 10^3 \text{ m/s}$ en $t = 1.8 \times 10^6 \text{ s}$ (trois semaines), la poussée moyenne requise est

$$T = m \frac{v}{t} = 2000 \times \frac{7.8 \times 10^3}{1.8 \times 10^6} \approx 8.7 \text{ N}.$$

Huit newtons — le poids d'une petite orange — est la poussée totale nécessaire pour atteindre l'orbite si appliquée continuellement pendant trois semaines.

Si le T/P du système est 0.03 N/W , typique d'une opération EAD efficace à basse pression, alors produire 8,7 N ne nécessite que environ **290 W** de puissance. Cela semble étonnamment petit, et en pratique, des pertes supplémentaires de traînée élèveront le besoin à des dizaines de kilowatts. Mais des panneaux solaires couvrant quelques centaines de mètres carrés peuvent facilement le fournir.

Incluons un facteur de sécurité de 100 pour les inefficacités et la traînée : environ **30 kW** de puissance électrique. Avec une efficacité globale de 15 % de lumière solaire à poussée, le véhicule doit récolter environ **200 kW de puissance solaire**. Cela correspond à environ 700 mètres carrés d'aire solaire active à 300 W/m^2 de sortie — une aire plus petite qu'un terrain de football, facilement intégrée sur un dirigeable de 100 mètres de long.

Cette arithmétique simple démontre que le **flux d'énergie est plausible**. Ce que les fusées accomplissent par densité de puissance, le dirigeable l'accomplit par patience et aire.

Traînée et le Couloir Haute Altitude

La traînée reste le principal puits d'énergie. La force de traînée est $F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_D$, et la puissance correspondante $P_D = F_D v = \frac{1}{2} \rho v^3 A C_D$.

À 50 km, $\rho \approx 10^{-3} \text{ kg/m}^3$. Si $A = 100 \text{ m}^2$, $C_D = 0.05$, et $v = 1000 \text{ m/s}$, alors

$$P_D = 0.5 \times 10^{-3} \times (10^3)^3 \times 100 \times 0.05 = 2.5 \times 10^6 \text{ W}.$$

C'est 2,5 mégawatts — trop élevé. Mais à 70 km, où $\rho = 10^{-5} \text{ kg/m}^3$, la même configuration ne produit que 25 kW de puissance de traînée. D'où la stratégie : **monter en accélérant**, restant sur une trajectoire où ρv^3 reste approximativement constant.

Le couloir optimal est un d'air qui s'amenuise constamment, peut-être 40–80 km d'altitude, où l'atmosphère fournit juste assez de densité neutre pour que l'EAD fonctionne mais peu assez pour garder la traînée gérable.

Contrôle du Véhicule et Stabilité

Sans hélices ou ailerons, la stabilité vient de la symétrie de champ. L'activation différentielle de tuiles fournit un couple. Si les tuiles avant à gauche produisent légèrement plus de poussée que celles à droite, l'engin lacet doucement. Le contrôle de tangage est atteint en biaisant les tuiles supérieures et inférieures. Comme la poussée par tuile est petite, la réponse est lente, mais l'engin opère dans un régime où l'agilité est inutile.

Des capteurs d'attitude — gyroscopes, accéléromètres, traqueurs d'étoiles — alimentent un système de contrôle numérique qui maintient l'orientation pour une incidence solaire maximale et un chemin de vol correct. La vaste taille du véhicule et le régime de vol lent le rendent remarquablement stable.

Sécurité Thermique et Électrique

L'opération EAD implique des dizaines à centaines de kilovolts à faible courant. Dans l'air raréfié et sec de la stratosphère, l'isolation se comporte différemment : les arcs peuvent se propager sur de longues distances sur les surfaces. Le design électrique du dirigeable traite ainsi toute la structure comme un système de potentiel contrôlé. Les chemins conducteurs sont redondants, avec des couches d'isolation séparant les cellules de gaz des lignes HV.

Les arcs ne sont pas catastrophiques — ils tendent à être locaux et auto-étouffants — mais ils peuvent endommager les électrodes. Chaque tuile monitorise sa forme d'onde de courant ; si une décharge spike, le contrôleur réduit la tension ou éteint le module affecté pendant plusieurs secondes.

Thermiquement, l'absence de convection signifie que tout chauffage local doit être étalé par conduction vers des panneaux radiatifs. Les matériaux sont choisis pour une haute émissivité et une faible absorption dans l'infrarouge, permettant à la chaleur excédentaire de rayonner dans l'espace.

Évolutivité et Modularité

Le système scale par tessellation, non par augmentation de tension. Doubler le nombre de tuiles double la poussée ; il n'y a pas besoin de décharges plus grandes. Cela rend l'architecture **évolutive linéairement** des modèles de laboratoire aux véhicules orbitaux.

Un prototype pratique pourrait commencer comme une petite plateforme remplie d'hélium avec une douzaine de mètres carrés de surface EAD, générant des poussées millinewton mesurées sur des heures. Des démonstrateurs plus grands pourraient suivre, chacun s'étendant en aire et puissance. La version orbitale finale peut s'étendre sur des centaines de mètres, avec des milliers de tuiles contrôlées indépendamment, opérant sous pleine puissance solaire pendant des mois à la fois.

Puisque tous les composants sont à état solide, le système a une durée de vie intrinsèquement longue. Il n'y a pas de roulements de turbine ou de cycles de combustion à user — seulement une érosion graduelle des électrodes et un vieillissement des matériaux. Avec un design soigné, le temps moyen entre pannes pourrait atteindre des années.

Profils d'Ascension et Transitions d'Altitude

La mission complète peut être visualisée comme une spirale douce dans le plan (v, ρ) : à mesure que la vitesse augmente, la densité diminue. Le chemin est choisi pour que le produit ρv^3 — qui détermine la puissance de traînée — reste en dessous d'un seuil que le système solaire peut fournir.

1. **Montée par flottabilité** à 30–40 km.
2. **Phase d'accélération** : maintenir approximativement $P_D \approx 20\text{--}50 \text{ kW}$ en ajustant le tangage et l'altitude.
3. **Transition vers le régime orbital** : au-dessus de 70 km, la portance et la flottabilité disparaissent, et le dirigeable devient effectivement un satellite encore effleurant l'atmosphère.

La transition de « vol » à « orbite » n'est pas une frontière nette. L'atmosphère s'estompe graduellement ; la poussée compense la traînée jusqu'à ce que la traînée cesse d'importer. Le chemin du véhicule devient circulaire plutôt que balistique, et il reste en l'air indéfiniment.

Bilan Énergétique et Endurance

Intégrant sur l'ascension complète, l'entrée d'énergie totale du Soleil est vaste comparée à ce qui est nécessaire. Même à un taux de collecte modeste de 100 kW, trois semaines d'opération continue accumulent

$$E = 100,000 \times 1.8 \times 10^6 = 1.8 \times 10^{11} \text{ J.}$$

Pour un véhicule de 2000 kg, cela fait **90 MJ/kg** — trois fois le besoin d'énergie cinétique orbitale. La plupart de cette énergie sera perdue en traînée et inefficacités, mais la marge est généreuse.

C'est la magie silencieuse de la patience solaire : quand le temps est autorisé à s'étendre, l'abondance d'énergie remplace la rareté de puissance.

Maintenance, Retour et Réutilisation

Après avoir complété sa mission orbitale, le dirigeable peut ralentir graduellement en inversant la polarité de son champ EAD. La traînée augmente à la descente ; le même mécanisme qui l'a soulevé agit maintenant comme frein. Le véhicule peut réentrer dans la stratosphère et flotter vers le bas sous flottabilité résiduelle.

Puisque aucune étape jetable n'est jetée, le système est **entièrement réutilisable**. L'enveloppe peut être entretenue, regazée et relancée. La maintenance implique de remplacer des tuiles ou films dégradés plutôt que de reconstruire des moteurs.

En contraste avec les fusées chimiques, où chaque lancement consomme des réservoirs et du propergol, le dirigeable EAD est un **vaisseau spatial de recyclage d'énergie**. Le Soleil le ravitaille continuellement ; seul l'usure nécessite une intervention humaine.

La Signification d'Ingénierie Plus Large

Les mêmes technologies habilitant un dirigeable EAD solaire — photovoltaïques légers, électronique de puissance haute tension, diélectriques en film mince — ont des applications terrestres immédiates. Plateformes de communication stratosphériques, capteurs climatiques haute altitude et drones longue endurance bénéficient tous des mêmes développements.

En poursuivant un système capable d'atteindre l'orbite sans carburant, nous inventons aussi une nouvelle classe de **véhicules aériens à état solide** — des machines qui volent non par combustion mais par manipulation de champs.

En ce sens, le projet Rise-Fly-Orbit s'inscrit dans une lignée incluant le Wright Flyer et les premières fusées à propergol liquide : non une technologie perfectionnée, mais une **preuve de principe** qui transforme ce que « vol » peut signifier.

Régulation, Stratégie et la Philosophie de l'Ascension Lente

La physique d'un dirigeable électro-aérodynamique solaire est permissive ; la loi ne l'est pas. Les règles de vol actuelles divisent le ciel en domaines délimités proprement : **espace aérien** régi par la loi de l'aviation, et **espace extra-atmosphérique** régi par la loi spatiale. Entre eux se trouve une région grise — trop haute pour la certification d'aéronefs, trop basse pour l'enregistrement orbital. Le dirigeable vers l'orbite vit carrément dans ce gris, se déplaçant continuellement à travers des altitudes qui, sur papier, n'appartiennent à aucune catégorie du tout.

Pourquoi C'est « Impossible »

Les **lois de l'espace aérien** supposent des véhicules qui décollent et atterrissent en heures. Elles requièrent des moteurs certifiés, des surfaces de contrôle aérodynamiques et la capacité de céder la place au trafic. Aucune de ces suppositions ne convient à un ballon autonome alimenté par solaire qui peut s'attarder des semaines au-dessus de 60 km.

Les **réglementations des véhicules de lancement** commencent où les fusées s'allument : un allumage discret, un site de lancement et un système de terminaison de vol conçu pour contenir les explosions. Notre dirigeable n'en a aucun. Il monte aussi lentement qu'un nuage ; il n'y a pas de « moment de lancement ». Pourtant, parce qu'il dépassera éventuellement Mach 1 et atteindra la vitesse orbitale, il tombe sous juridiction spatiale. Le résultat est paradoxal : il ne peut pas voler légalement comme aéronef, mais doit être licencié comme une fusée à laquelle il ne ressemble pas.

Une Classe de Véhicule Atmosphérique-Orbital Hybride

Le remède est de reconnaître une nouvelle catégorie — un **Véhicule Atmosphérique-Orbital Hybride (HAOV)**. Ses traits définissants seraient :

- **Croisement de domaine continu** : ascension de la surface à l'espace proche sans étapes discrètes.
- **Flux d'énergie cinétique faible** : échange total d'élan avec l'atmosphère de nombreux ordres de grandeur en dessous de celui des fusées.
- **Comportement de défaillance sûre passif** : en perte de puissance, l'engin dérive et descend ; il ne tombe pas balistiquement.
- **Suivi coopératif** : toujours visible aux radars et capteurs satellites, diffusant son vecteur d'état beaucoup comme les transpondeurs ADS-B pour les aéronefs.

Le cadre HAOV permettrait la certification de tels engins sous **critères basés sur la performance** plutôt que **basés sur le hardware** — définissant la sécurité en termes de libération d'énergie, empreinte au sol et capacité de descente autonome au lieu de la présence de moteurs ou de carburant.

Des **couloirs** océaniques ou désertiques pourraient être désignés où les HAOV peuvent opérer continuellement, surveillés par les réseaux existants de trafic spatial. Leur ascension poserait moins de danger pour l'aviation qu'un seul ballon météo, mais les règles actuelles ne leur offrent aucun chemin.

La Politique de la Patience

La régulation suit la culture, et la culture est accro à la vitesse. Les jalons aérospatiaux sont mesurés en rapports poussée-poids et minutes vers l'orbite. L'idée qu'un véhicule prenne **trois semaines** pour atteindre l'orbite sonne, à l'oreille première, comme une régression. Mais la patience est le prix de la durabilité. Le dirigeable propose une métrique différente : non « à quelle vitesse pouvons-nous brûler de l'énergie » mais « à quelle vitesse pouvons-nous l'accumuler continuellement ».

Pour les agences spatiales habituées aux fenêtres de lancement et aux comptes à rebours, un tel engin exige un changement d'opérations : planification de missions par saisons plu-

tôt que par secondes ; insertions orbitales dépendant de la géométrie solaire, non de la disponibilité de la plateforme. Pourtant, ce changement s'aligne avec le virage plus large vers une **infrastructure d'état stationnaire** — vaisseaux spatiaux solaires-électriques, stations réutilisables, plateformes climatiques persistantes.

Valeur Stratégique

Un véhicule solaire-EAD réutilisable offre des capacités qu'aucune fusée ou avion ne peut égaler :

- **Observation et communications haute altitude persistantes** : avant orbite complète, le dirigeable peut flotter des mois dans la stratosphère supérieure, relayant des données ou imagant la Terre.
- **Livraison de charge incrémentale** : de petites charges utiles peuvent être élevées doucement sans les chocs acoustiques et thermiques du lancement.
- **Analogues planétaires** : sur Mars, où la vitesse orbitale n'est que de 3,6 km/s et la pression atmosphérique favorise l'accélération ionique à long chemin, la même architecture pourrait fonctionner encore mieux.
- **Gestion environnementale** : pas d'échappement, pas de fuites de propergol, impact acoustique négligeable.

Économiquement, les premiers HAOV opérationnels ne remplaceraient pas les fusées mais les complèteraient, servant des niches où la patience de charge utile l'emporte sur l'urgence. Stratégiquement, ils découpleraient l'accès à l'espace proche des chaînes d'approvisionnement en propergol — une caractéristique attrayante pour les agences spatiales cherchant une infrastructure durable.

Ingénierie du Livre de Règles

Créer une catégorie HAOV est moins du lobbying que de la **mesure**. Les régulateurs font confiance aux données. Le chemin en avant est la transparence expérimentale :

1. **Démonstrateurs basés sur l'hélium** dans des couloirs isolés, instrumentés pour enregistrer la trajectoire, l'usage d'énergie et le comportement de défaillance.
2. **Téléométrie continue** partagée avec les réseaux d'aviation civile et de suivi spatial pour prouver des dynamiques de vol prévisibles.
3. **Simulation et modèles de risque** montrant que le flux d'énergie cinétique pire cas sur des régions habitées est négligeable.

Une fois que les agences verront des preuves quantifiées qu'un HAOV ne peut pas nuire aux aéronefs ou aux populations terrestres, l'architecture légale suivra — comme elle l'a fait pour les ballons haute altitude et les drones avant eux.

Dimension Éthique

Le vol lent a un poids moral. Les lanceurs chimiques polluent non parce que les ingénieurs sont négligents mais parce que la physique n'offre pas de temps pour recycler leur chaleur. Un dirigeable solaire, en revanche, ne consomme rien d'irréparable. Il remplace le bruit

par le silence, l'éclair par le éclat. Son ascension serait visible depuis le sol comme un point brillant et sans hâte, un artefact humain grimpant sans violence.

Dans un âge d'urgence, un tel mouvement délibéré est une déclaration : que l'ambition technologique n'a pas besoin d'être explosive pour être profonde.

La Patience de la Lumière

Quand une fusée atteint l'orbite, elle le fait par accélération brute : des secondes de combustion qui laissent le ciel trembler. Le dirigeable électro-aérodynamique arrive différemment. Chaque photon frappant sa peau contribue un murmure d'élan, médié par des électrons, des ions et les mathématiques calmes des équations de Maxwell. Sur trois semaines, ces murmures s'accumulent en orbite.

La même expression — $\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E}$ — qui décrit un microampère de dérive ionique en laboratoire gouverne aussi un corps porteur de mille tonnes glissant à travers la haute atmosphère. L'échelle change ; le principe non. Le tenseur de Maxwell, la loi de Coulomb et la patience de la lumière solaire sont universels.

Si l'humanité apprend à exploiter cette patience, nous gagnons une nouvelle façon de quitter la Terre — une qui peut être répétée indéfiniment, alimentée par la même étoile qui nous soutient.

Vers un Âge de Vol Réversible

La fuséologie chimique est un geste à sens unique : effort immense pour atteindre l'orbite, et fin abrupte à la rentrée. Le dirigeable électro-aérodynamique suggère un **chemin réversible**. Il peut grimper et descendre à volonté, résidant n'importe où de la troposphère à l'orbite. Il est à la fois vaisseau spatial et habitat, véhicule et station.

Dans cette continuité réside une inversion philosophique : vol spatial non comme départ mais comme extension de l'atmosphère. Le gradient d'air à vide devient un terrain navigable. De tels engins brouilleraient la ligne entre météorologie et astronautique, transformant le « bord de l'espace » en un espace de travail vivant plutôt qu'une barrière.

Réflexions Finales

Aucune nouvelle physique n'est nécessaire — seulement endurance, précision et régulation réimaginée. Le budget énergétique orbital peut être payé en lumière solaire ; la poussée peut naître de champs électriques agissant sur des ions ; le temps peut être emprunté à la patience des ingénieurs.

Les obstacles sont culturels et bureaucratiques : convaincre les agences qu'un quelque chose ressemblant à un ballon peut, par mathématiques et persévérance, devenir un satellite. Pourtant, chaque technologie transformative a commencé comme une anomalie dans la paperasse.

Quand le premier de ces vaisseaux électro-aérodynamiques solaires montera, son progrès sera presque imperceptible heure par heure. Mais jour après jour, il accumulera de la vitesse, jusqu'à ce qu'il glisse enfin au-delà de la portée du temps. Il n'y aura pas de rugissement — seulement le bourdonnement faible et continu des champs et l'accumulation stable de lumière solaire en mouvement.

Cela marquera le début d'un **accès réutilisable, durable et doux à l'orbite** : une façon de monter, de voler et — sans jamais allumer une allumette — d'orbit.

Références et Lecture Complémentaire

- **Projet Rise Fly Orbit** : <https://riseflyorbit.org/> — aperçu du concept de dirigeable solaire vers l'orbite et de la recherche associée.
- **Essai sur la Propulsion Électro-Aérodynamique** : https://farid.ps/articles/electroaerodynamic_propulsion/en.html — traitement théorique en profondeur de la poussée électro-aérodynamique utilisant le tenseur de contrainte de Maxwell et la formulation de force corporelle de Coulomb.
- Barrett, S. et al., *Nature* (2018). « Flight of an Aeroplane with Solid-State Ionic Propulsion. » — première démonstration d'un avion à aile fixe propulsé par propulsion ionique à état solide.
- Paschen, F. (1889). « Ueber die zum Funkenübergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensäure erforderliche Potentialdifferenz. » *Annalen der Physik*, 273(5).
- Sutton & Biblarz, *Rocket Propulsion Elements*, 9e éd. — pour le contraste dans les budgets énergétiques et les considérations Δv .
- NASA Glenn Research Center, « Solar Electric Propulsion Basics. » — fond sur les systèmes de poussée électrique haute efficacité.