

Propulsion Électroaérodynamique - Alimentée par Maxwell et Coulomb

Les idées présentées dans cet essai proviennent de dizaines d'expériences réalisées par l'auteur entre 2016 et 2018, explorant la propulsion électroaérodynamique avec une large gamme de sources d'alimentation (AC et DC), de géométries d'électrodes et de types d'émetteurs d'ions. Ces investigations ont abouti à la construction du rotor de 80 cm représenté ci-dessous, qui a atteint une vitesse de rotation de 18 tr/min avec moins de 6 kV et seulement environ 100 mW de puissance électrique d'entrée.

Cette campagne expérimentale a révélé que les performances dépendent bien plus de la distribution et de la géométrie des champs électrostatiques que du mouvement de l'air ou du courant ionique lui-même. Ces observations ont posé les bases de la reformulation théorique de la propulsion électroaérodynamique qui suit.

Propulsion Électroaérodynamique - Le Moteur Silencieux

La propulsion électroaérodynamique (EAD) - souvent appelée poussée électrohydrodynamique (EHD) ou « vent ionique » - est l'une de ces technologies rares qui semblent sorties de la science-fiction : un dispositif qui se déplace silencieusement dans l'air sans pièces mobiles, sans combustion et sans échappement visible. Le public en a entendu parler pour la première fois au début des années 2000 à travers des projets de « lifters » dans des jardins, et à nouveau en 2018 lorsque le MIT a démontré un « avion ionique » glissant à travers un gymnase.

Pourtant, la physique sous-jacente a une histoire plus longue et plus complexe. Près d'un siècle plus tôt, Thomas Townsend Brown et Paul Biefeld ont observé que des condenseurs haute tension pouvaient générer une petite poussée persistante. Brown a attribué l'effet à l'« antigravité ». La science moderne, armée des lois de Maxwell et de Coulomb, reconnaît que la vérité est plus subtile - et, à bien des égards, plus profonde.

La propulsion EAD ne consiste pas à souffler de l'air avec des ions. Il s'agit de **sculpter des champs électriques** de manière à ce que les **contraintes électrostatiques** résultantes produisent une force mécanique nette. Dans ce sens, les dispositifs EAD sont alimentés par Maxwell et Coulomb : par la géométrie et la dynamique du champ électrique lui-même.

La Méconception du Vent Ionique

Demandez à la plupart des ingénieurs ce qu'est la propulsion EHD et vous entendrez une histoire simple : un émetteur pointu produit des ions par décharge couronne ; ces ions s'accélèrent vers une électrode collectrice, entrant en collision avec des molécules d'air

neutres en chemin et leur transférant de l'impulsion. Le gaz neutre se déplace - le fameux « vent ionique » - et, par la troisième loi de Newton, le dispositif subit une poussée égale et opposée.

Cette image n'est pas fausse, mais elle est incomplète.

En pratique, les ions transportent une masse négligeable. Leurs collisions avec les neutres sont fréquentes, oui, mais l'impulsion transférée par collision est minime. Plus important encore, **aucune force mécanique significative n'agit directement sur la pointe de l'aiguille ou le collecteur**. Le « vent » est un sous-produit, non la source, de la propulsion.

Le véritable moteur réside dans le **champ électrique** qui accélère ces ions - dans la redistribution de l'énergie électrostatique alors que la charge spatiale se forme et s'écoule.

Pression de Champ et Contrainte de Maxwell

Les équations de Maxwell décrivent comment les champs électriques stockent et transforment l'impulsion via le **tenseur de contrainte de Maxwell** :

$$\mathbf{T} = \epsilon_0(\mathbf{EE} - \frac{1}{2}E^2\mathbf{I})$$

L'intégration de ce tenseur sur la surface de n'importe quel corps donne la **pression électrostatique nette** qui y agit. Cette pression - non le mouvement de l'air - est ce qui pousse un propulseur EHD vers l'avant.

Lorsqu'une décharge couronne se produit, un nuage d'ions se forme autour de l'émetteur. Ces ions font deux choses critiques :

1. **Ils masquent partiellement le champ électrique de l'émetteur.** L'intensité du champ local diminue près de la pointe, mais reste forte dans le volume environnant.
2. **Ils déforment la géométrie globale du champ.** D'un côté de l'émetteur, les lignes de champ se terminent sur des surfaces chargées proches ou des structures mises à la terre. De l'autre, elles s'étendent vers l'extérieur, partiellement neutralisées par la charge spatiale.

Le résultat est un **déséquilibre de la pression électrostatique** sur le système émetteur-collecteur - une force nette. L'impulsion coule du champ vers les électrodes, non par des collisions moléculaires.

La Loi de Coulomb en Action

Au niveau le plus simple, les forces impliquées sont décrites par la loi de Coulomb :

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}$$

Chaque élément de surface chargé d'une structure EHD attire ou repousse chaque autre région chargée dans son environnement. La poussée totale est la somme vectorielle de ces innombrables interactions coulombiennes, continuellement remodelées par les ions en mouvement qui modulent le champ.

Dans un état stationnaire de couronne, une fine gaine d'ions positifs se situe entre un émetteur haute tension et un collecteur relativement négatif (ou l'environnement environnant). Ces ions servent de **médiateurs** : ils masquent partiellement l'attraction entre l'émetteur et le collecteur, et en se déplaçant, réinitialisent continuellement l'asymétrie du champ. L'entrée électrique constante maintient cet déséquilibre, convertissant l'énergie potentielle électrostatique en force mécanique.

Leçons de la NASA et les Limites du Paradigme du Vent Ionique

Au début des années 2000, la NASA et ses sous-traitants ont revisité des dispositifs de type Biefeld-Brown dans le cadre des études Gravitec et Talley AIAA. En utilisant des condenseurs asymétriques haute tension dans des environnements atmosphériques et sous vide, les expériences visaient à tester si l'effet pouvait persister en l'absence d'air.

Les résultats étaient sans équivoque - et involontairement révélateurs.

En mode atmosphérique, les rotors ont atteint une rotation à peine mesurable (1-2 tr/min) et une poussée dans la plage 10-100 μN - des ordres de grandeur inférieurs à ce qui serait attendu si les dispositifs exploitaient vraiment un effet gravitationnel. Le mouvement était entièrement attribuable à une décharge couronne conventionnelle et à un faible vent ionique.

Sous vide, à des pressions descendant à 10^{-6} Torr, le mouvement a cessé complètement. Tout signal transitoire a été tracé jusqu'à un dégazage ou une charge résiduelle de surface. Sans molécules d'air pour maintenir l'ionisation, le champ électrostatique est devenu symétrique, et la force a disparu.

Les investigateurs ont conclu que la poussée variait grossièrement de manière linéaire avec la densité de l'air - un résultat souvent cité pour « débunker » la propulsion EHD comme impossible sous vide. Mais ce qu'il a vraiment démontré est plus profond : **sans un milieu pour transporter la charge spatiale, le champ électrique perd l'asymétrie qui produit les gradients de pression électrostatique.**

En d'autres termes, ces premiers tests ont accidentellement confirmé l'**interprétation de la contrainte de Maxwell** de la propulsion électroaérodynamique. Ce n'était ni la gravité, ni un simple traînée ionique - c'était la présence d'un **déséquilibre de champ médiatisé par la charge** qui importait.

Les dispositifs Gravitec, construits pour la simplicité et la symétrie, manquaient de tout **réervoir de charge** significatif ou de **diélectrique formeur de champ**. Leurs géométries

ouvertes diffusaient les lignes de champ dans l'environnement, gaspillant la plupart de l'énergie électrostatique.

À l'opposé, le rotor EPS-aluminium décrit ici concentrait la charge le long d'une peau conductrice bien définie, permettant à la région de charge spatiale de *sculpter* le champ local. Résultat : une poussée utilisable avec moins de 6 kV et environ 100 mW - une performance près de deux ordres de grandeur meilleure en efficacité énergétique.

Ces découvertes font écho à un thème constant : **l'efficacité électroaérodynamique émerge non du voltage ou du flux d'air, mais du contrôle de la topologie de charge et de la géométrie de champ.**

L'Effet Réservoir de Charge

Une feuille légère sur un noyau rigide et isolant se comporte comme plus qu'un simple conducteur - elle forme un **réservoir de charge de grande surface** qui amplifie l'asymétrie du champ électrique. Dans le design actuel, le polystyrène expansé (EPS) sert purement de **support structurel léger**, sa surface entière enveloppée de feuille d'aluminium qui est **électriquement continue avec l'alimentation haute tension**. L'EPS ajoute une fonction électrique négligeable ; sa valeur réside dans la possibilité d'une grande surface conductrice à masse minimale.

Cette peau conductrice étendue stocke la charge directement de l'alimentation, permettant à la décharge couronne d'opérer contre un **champ électrostatique pré-chargé** plutôt que de le construire à partir de zéro à chaque cycle. La grande surface de la feuille augmente dramatiquement la capacité effective - de l'ordre de $10\text{--}100 \text{ pF cm}^{-2}$, selon la texture et la courbure de la surface - et convertit une tension appliquée modeste en un gradient de champ électrique local beaucoup plus fort.

Lorsque la couronne s'allume, la feuille agit comme une référence de potentiel stabilisante. Les ions émis modulent légèrement le champ local mais ne le dominent pas ; au lieu de cela, la charge de surface stockée maintient une asymétrie stable qui produit une poussée continue à très faible puissance.

Du point de vue de la contrainte de Maxwell, la force est proportionnelle à l'intégrale de l'intensité du champ et de son gradient :

$$\mathbf{F} \approx \epsilon_0 \int (\mathbf{E} \cdot \nabla \mathbf{E}) dV$$

et la grande feuille bien chargée maximise les deux termes sans nécessiter une tension ou un courant plus élevé. Cela explique pourquoi un rotor basse puissance et basse tension pouvait atteindre une rotation significative : il a substitué l'**énergie électrostatique stockée** aux pertes de courant ionique élevées des géométries « vent ionique » conventionnelles - une forme pratique d'**efficacité électrostatique**.

La Géométrie de l'Efficacité

L'efficacité d'un propulseur EHD n'est pas déterminée par la vitesse du flux d'air, mais par **l'efficacité avec laquelle le champ électrique est façonné**. Les paramètres clés incluent :

- **Asymétrie du Champ** : La composante directionnelle nette du gradient de pression électrostatique.
- **Distribution de Densité de Charge** : Comment le nuage d'ions modifie ce champ par masquage partiel.
- **Couplage Capacitif** : La charge totale stockée sur les surfaces opposées par volt appliqué.
- **Canaux de Perte** : Pertes couronne, recombinaison et fuite diélectrique.

Les designs qui confinent et façonnent le champ - par exemple, en plaçant une large surface oppositement chargée près de l'émetteur - peuvent obtenir des améliorations d'ordres de grandeur en poussée par watt. Le champ électrique fait le travail ; les ions ne font que permettre au champ de rester asymétrique et dynamique.

Réexamen de Biefeld-Brown

Les premières observations de Brown sur la poussée des condensateurs asymétriques précèdent notre compréhension moderne de la physique des plasmas. Sans le cadre de la contrainte de Maxwell ou de la dynamique de charge spatiale, il était naturel de penser que l'effet pourrait impliquer la gravité. Le fait que les propulseurs EHD produisent une force « contre » le vecteur de champ (et parfois verticalement vers le haut) n'a fait qu'approfondir le mystère.

Vues à travers le prisme d'aujourd'hui, l'« antigravité » de Brown n'était que de la pression électrostatique rendue visible. La similarité de forme mathématique - à la fois les énergies potentielles gravitationnelle et électrostatique décroissent comme $1/r^2$ - rendait la confusion historiquement compréhensible, mais la physique est entièrement électromagnétique.

Perspectives et Contexte Moderne

Les analyses récentes et les discussions entre pairs renforcent cette reformulation de la propulsion électroaérodynamique comme un **phénomène de gradient de champ** plutôt qu'un moteur à vent ionique. Dans les configurations classiques de lifters, des courants couronne de l'ordre du milliampère à des dizaines de kilovolts produisent des densités de poussée dans la plage micro- à millinewton par watt - un reflet de la faible quantité d'énergie de champ électrique qui se traduit en contrainte mécanique dirigée. À l'opposé, le rotor EPS enveloppé de feuille convertit la même loi physique en un processus *piloté par la charge* : la large surface conductrice maintient un fort gradient E avec un courant minimal, troquant les pertes de dérive pour de l'énergie de champ stockée.

Cette distinction fait écho à un changement plus large dans la recherche contemporaine. Les **actionneurs à décharge à barrière diélectrique** dans le contrôle aérodynamique dérivent également leur force de surface de la contrainte de Maxwell plutôt que d'un flux d'air volumique, atteignant des efficacités de $10-100 \text{ N kW}^{-1}$ lorsque la géométrie des élec-

trodes est accordée pour l'asymétrie. Les **géométries d'électrodes flottantes et de confinement** étudiées à l'ONERA et dans les programmes EHD de l'UE montrent des augmentations de poussée de deux à cinq fois en façonnant la gaine ionique - précisément la logique de design du rotor réservoir de charge. Et dans des **environnements à air raréfié**, comme la stratosphère supérieure ou l'atmosphère martienne, où la traînée ionique faiblit mais la contrainte électrostatique persiste, des surfaces riches en charge peuvent maintenir la propulsion longtemps après l'échec des designs conventionnels.

La physique s'aligne parfaitement avec le cadre de l'impulsion de Poynting de l'électromagnétisme classique : la poussée correspond au gradient de la densité d'énergie de champ,

$$\mathbf{F} \approx \epsilon_0 \int (\mathbf{E} \cdot \nabla \mathbf{E}), dV$$

signifiant que le système tire l'impulsion directement du champ électromagnétique. Les ions sont des catalyseurs maintenant le déséquilibre, non la masse de réaction elle-même. Cela explique pourquoi, dans les expériences sous vide où le champ devient symétrique, la poussée disparaît - le terme $\nabla \mathbf{E}$ s'effondre. Inversement, dans le rotor réservoir de feuille, la peau capacitive garde \mathbf{E} raide et directionnelle, produisant environ **0.1-1 mN** de poussée équivalente en couple à partir de seulement **100 mW** de puissance d'entrée - 10-100 fois l'efficacité des dispositifs de traînée ionique.

Paramètre	Design Conventionnel Vent Ionique	Rotor Réservoir de Charge en Feuille	Implication
Tension	20-50 kV	< 6 kV	Risque de claquage moindre, mise à l'échelle plus facile
Puissance	1-10 W	≈ 0.1 W	10-100× poussée plus élevée / W
Mécanisme de Poussée	Collisions ion-neutre	Gradient de champ (contrainte de Maxwell)	Largement indépendant de la densité d'air
Élément Clé	Écart émetteur-collecteur	Réservoir capacitif en feuille	Charge stockée > courant transitoire
Efficacité (N kW⁻¹)	0.01-0.1	1-10 (inféré)	Faisable pour micro-UAV

De telles comparaisons mettent en lumière un pivot conceptuel : **de la propulsion pilotée par courant à la propulsion pilotée par charge**, du mouvement de matière au façonnage de champs. La prochaine frontière est ce qu'on pourrait appeler *l'architecture électrostatique* - utilisant l'optimisation computationnelle et des matériaux avancés (émetteurs en nanotubes de carbone, feuilles texturées, diélectriques méta-matériaux) pour maximiser $\int \mathbf{E} \cdot \nabla \mathbf{E}$. Les modes DC pulsés hybrides pourraient exploiter davantage le stockage de charge transitoire tout en réduisant les sous-produits chimiques.

Conclusion - Alimentée par Maxwell et Coulomb

La propulsion électroaérodynamique n'est pas une curiosité exotique ou une anomalie pseudoscientifique. C'est une manifestation directe des lois de Maxwell et de Coulomb - une machine macroscopique qui convertit l'énergie potentielle électrostatique en mouvement par une asymétrie de champ contrôlée.

Où les premiers inventeurs voyaient l'« antigravité » et les projets modernes voient le « vent ionique », l'histoire réelle est plus simple et plus profonde : **les champs électriques possèdent une tension**. Façonnez cette tension, et vous pouvez vous propulser à travers l'air sans pièces mobiles, sans carburant et sans bruit.

C'est le génie silencieux de la propulsion électroaérodynamique - véritablement, **alimentée par Maxwell et Coulomb**.

Références

1. Talley, C. et al. *Évaluation de l'Effet Biefeld-Brown : Tests de Propulseurs à Condensateurs Asymétriques en Vide et en Atmosphère*. AIAA Paper 2003-1023, NASA Marshall Space Flight Center, 2003.
2. Brown, T. T. *Appareil Électrocinétique*. U.S. Patent No. 3,187,206, 1965.
3. Wilson, S., Barrett, S. R. *Vol d'un Avion avec Propulsion Ionique à État Solide*. *Nature* **563**, 532–535 (2018).
4. Moreau, E. *Contrôle du Flux d'Air par Actionneurs Plasma Non Thermiques*. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40**, 605–636 (2007).
5. Ronney, P. D. *Contrôle de Flux EHD et Actionneurs Plasma*. NASA Technical Reports Server, 2015.
6. Programme EHD ONERA : *Propulsion Électrohydrodynamique et Contrôle de Flux*. Rapports Internes 2018–2023.