

CEA-R 3158

BRUN S. .-

L'Electrohydrodynamique: un procédé de conversion a. recte  
d'énergie à haute tension.-

Commissariat à l'énergie atomique, Centre d'études  
nucléaires de Grenoble (Isère), 1967.-

27 cm, 44 p., fig.

CEA-R 3158 - BRUN Serge

**L'ELECTROHYDRODYNAMIQUE : UN PROCEDE DE CONVERSION  
DIRECTE D'ENERGIE A HAUTE TENSION**

**Sommaire.** - Cette analyse est une étude théorique et pratique d'un générateur de puissance électrique à haute tension, basé sur le principe du générateur Van de Graaff, la différence principale étant que les charges produites sont transportées par un gaz en mouvement et non par une courroie.

Les propriétés électriques et thermiques d'un tel générateur sont étudiées ainsi que le problème délicat de la production des particules ionisées utilisées dans la conversion.

Un certain nombre de résultats publiés sur ce procédé de conversion d'énergie cinétique en énergie électrique sont reproduits, ainsi que les applications possibles aux problèmes spatiaux.

1967

45 P.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

CEA-R 3158 - BRUN Serge

**ELECTROHYDRODYNAMICS : A HIGH-TENSION DIRECT ENERGY  
CONVERSION PROCESS**

**Summary.** - This analysis consists of a theoretical and practical study of a high-tension electrical power generator based on the Van de Graaff generator principle, the main difference being that the charges produced are transported by a gas in motion and not by a belt.

The electrical and thermal properties of such a generator are studied, as well as the difficult problem of the production of the ionised particles used in the conversion.

A certain number of results already published on this process for converting kinetic energy into electrical energy is given, as well as some possible applications in the field of space technology.

1967

45 P.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

PREMIER MINISTRE  
COMMISSARIAT A  
L'ÉNERGIE ATOMIQUE

CEA - R 3158

**L'ELECTROHYDRODYNAMIQUE**  
**UN PROCEDE DE CONVERSION DIRECTE D'ENERGIE**  
**A HAUTE TENSION**

par

Serge BRUN

**Rapport C E A - R 3158**

**1967**

**Da**

CENTRE D'ETUDES  
NUCLEAIRES DE GRENOBLE

Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble

Laboratoire d'Applications Spéciales  
de la Physique

L'ELECTROHYDRODYNAMIQUE  
UN PROCEDE DE CONVERSION DIRECTE D'ENERGIE  
A HAUTE TENSION

par

Serge BRUN

(Note CENG/ASP 66-04 de juin 1966)

*Les rapports du COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE sont, à partir du n° 2200, en vente à la Documentation Française, Secrétariat Général du Gouvernement, Direction de la Documentation, 51, quai Voltaire, PARIS VIIème.*

*The C.E.A. reports starting with n° 2200 are available at the Documentation Française, Secrétariat Général du Gouvernement, Direction de la Documentation, 31, quai Voltaire, PARIS VIIème.*

1 - INTRODUCTION

2 - ETUDE THEORIQUE

- 2.1 . Lois régissant l'écoulement du fluide ionisé .
- 2.2. Conversion à état thermodynamique constant .
- 2.3. Conversion d'énergie à vitesse constante .
- 2.4. Tension et puissance de sortie maximales .
- 2.5. Champ électrique dans la tuyère .
- 2.6. Densité de charge limite - Mobilité .
- 2.7. Etude théorique du rendement .
- 2.8. Production des particules ionisées .
- 2.9. Fluide utilisé .

3 - RESULTATS EXPERIMENTAUX

- 3.1. Travaux antérieurs .
- 3.2. Ionisation au cours de la détente .
- 3.3. Convertisseur d'énergie E.H.D. colloïdal .
- 3.4. Conversion E.H.D. au moyen d'un canal segmenté .
- 3.5. Convertisseur E.H.D. utilisant des aérosols .
- 3.6. Générateur E.H.D. utilisant un liquide porteur .

4 - APPLICATIONS

- 4.1. Utilisation de l'énergie solaire .
- 4.2. Utilisation de l'énergie nucléaire .
- 4.3. Couplage avec un autre générateur .

5 - CONCLUSION

Liste des symboles - Figures - Bibliographie .

# L'ELECTROHYDRODYNAMIQUE UN PROCEDE DE CONVERSION DIRECTE D'ENERGIE A HAUTE TENSION

## 1 - INTRODUCTION

### Historique et principes généraux

L'E.H.D. est basée sur le principe de la conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique, conversion qui est obtenue grâce à la force de décélération exercée par un champ électrique sur des ions ou sur des particules, ou gouttelettes chargées. Ce principe est ancien et était même connu autrefois sous le nom d' "Effet ARMSTRONG", du nom du premier physicien qui a effectué une étude qualitative du phénomène (1840) [1] [2]. FARADAY [3] avait complété ces études, mais à cette date, ils ne disposaient pas des connaissances et des moyens suffisants, notamment en ce qui concerne les instruments de mesures, et ils ne purent éclaircir avec succès les phénomènes qu'ils avaient observés et qui comportaient des propriétés qu'il était très intéressant d'étudier. Cet effet ARMSTRONG pouvait se schématiser ainsi : de la vapeur d'eau, préalablement humidifiée, s'échappait par une tuyère d'une chaudière isolée du sol et venait frapper un conducteur métallique isolé également du sol. Le jet de vapeur s'électrisait positivement et communiquait sa charge au conducteur métallique, tandis que la tuyère d'échappement et la chaudière s'électrifaient négativement. Il s'établissait ainsi une différence de potentiel atteignant plusieurs milliers de volts entre la tuyère négative et le conducteur positif.

Ultérieurement, A. MILHOUD (1934) [4] réalisa des expériences semblables d'où il put conclure que l'état d'humidité de la vapeur d'eau avait une importance capitale sur le phénomène d'électrisation. De plus, l'électrisation des gouttelettes semblait directement liée à la détente de la vapeur après son passage dans la tuyère, car de cette détente résultait la condensation de la vapeur, et la réfrigération de la vapeur par l'air ambiant entraînait elle aussi une condensation de la vapeur. Des expériences plus précises [5] montrèrent que l'électrisation de la vapeur était maximale à l'endroit où la condensation était maximale, mettant en évidence la propriété caractéristique de cette conversion d'énergie qui est que le jet de vapeur s'électrise d'autant plus que la condensation de la vapeur sur les gouttelettes est d'autant mieux réalisée.

Ces recherches préliminaires, si elles ne permettaient pas la compréhension parfaite du mécanisme de cette conversion d'énergie (l'électrisation en particulier), donnaient par contre des résultats remarquablement concordants :

- les tensions électriques obtenues étaient de l'ordre de quelques milliers de volts (parfois même de dizaines de milliers de volts)
- les courants débités étaient très faibles (quelques dizaines de microampères)
- la puissance maximale obtenue était toujours voisine de 0,1 W.

Avec certaines solutions, ARMSTRONG avait même obtenu un courant de 1mA, mais sous quelques centaines de volts seulement.

Dans cette première méthode de conversion E.H.D. les particules ionisées sont produites dans la détente d'un gaz à travers une tuyère supersonique dans une enceinte où règne une pression faible [6]. Ainsi, l'énergie cinétique importante est communiquée aux particules de très haute mobilité. Ce système n'est pas susceptible, cependant, d'être perfectionné car, d'une part la dispersion du jet ionisé dû à la charge d'espace résultante est très grande, et d'autre part, la vapeur étant tout de suite en contact avec l'air ambiant, le système travaille dans de mauvaises conditions thermodynamiques.

De plus, la proportion des particules électrisées étant faible, l'énergie employée pour propulser les particules non électrisées qui sont beaucoup plus nombreuses est totalement perdue dans les productions d'énergie électrique.

Le rendement de tels générateurs est faible car la consommation atteignait 36 tonnes de vapeur pour produire 1 kWh [7].

Une deuxième méthode plus rentable consiste à placer dans un fluide des particules ionisées auxquelles l'énergie cinétique est communiquée. Pour que cela donne un bon résultat la vitesse de glissement des particules doit être négligeable, comparée à la vitesse du fluide porteur. Ces ions peuvent même être mis en suspension dans un liquide isolant [8] [9]. Ce principe est très rentable pour la production de hautes tensions, malheureusement les pertes par frottements sur les parois diminuent, dans de très fortes proportions, ses capacités comme source de puissance.

La dernière méthode consiste à augmenter la taille des particules ionisées et à les mettre en suspension dans un gaz, afin d'avoir une faible vitesse de glissement et de faibles pertes par frottement [10]. Cette méthode permet d'obtenir de fortes densités de charge et permet d'édifier des unités de conversion à plusieurs étages. Puisque l'énergie cinétique d'un gaz peut aisément être obtenue à partir de la détente de ce gaz par apport de chaleur, il est possible d'utiliser ce procédé pour convertir la chaleur en énergie cinétique et ensuite en énergie électrique. Ces deux dernières

méthodes donnent des puissances notablement plus importantes et surtout un rendement supérieur.

En conclusion, on voit que la conversion E.H.D. est fonction de nombreux paramètres [11] [12] [13] qu'il est nécessaire de choisir judicieusement afin d'avoir de bons résultats, mais que malheureusement ces paramètres ne sont pas indépendants et souvent ce qui est avantageux pour l'un de ceux-ci est désavantageux pour un autre. En effet, il est nécessaire :

- 1°/ d'avoir une forte concentration ionique pour qu'il existe une grande densité de courant. (Cette densité sera augmentée grâce à l'emploi d'un ioniseur). Mais cette charge d'espace trop élevée augmentera la dispersion du faisceau, ce qui diminuera considérablement le rendement ;
- 2°/ que le profil de la tuyère soit tel que l'écoulement du fluide se fasse avec des pertes par frottement minimales ;
- 3°/ que la longueur du canal soit suffisante pour qu'une source haute tension soit obtenue ; mais cette longueur sera telle que les forces électriques pourront agir sur les particules chargées sur une distance restant compatible avec les limitations dues au champ disruptif [14] et au dépôt des particules qui facilite la recombinaison des ions, d'où une diminution du taux d'ionisation ;
- 4°/ pour augmenter le rendement, de focaliser le faisceau au moyen de lentilles électrostatiques [15] ;
- 5°/ que le choix du gaz, de l'ioniseur, de la tuyère et du collecteur soit tel que la puissance volumique soit la plus grande possible ;
- 6°/ qu'étant donné les missions auxquelles sont destinées les convertisseurs E.H.D., l'encombrement soit minimum (problème de l'évacuation de la chaleur). Ces missions seront celles où l'emploi de générateurs électriques ayant des parties tournantes ou mobiles présentera des inconvénients [16] et où il sera nécessaire d'avoir de la haute tension.

Il est donc nécessaire de faire une étude théorique du phénomène afin de définir clairement l'intervention de ces paramètres. Les conclusions qui en seront tirées permettront de mieux analyser les résultats des expériences les plus importantes qui ont été réalisées ces dernières années.

## 2 - ETUDE THEORIQUE

La nature des particules chargées n'influe pas sur le comportement du générateur E.H.D. En effet, que celles-ci soient des ions obtenus à partir du gaz porteur lui-même, ou à partir d'une source indépendante, pour être injectés ensuite dans le gaz porteur, le comportement électrique du générateur n'est pas changé. Seule compte la quantité de particules en mouvement avec le gaz. Si bien que l'étude théorique du générateur E.H.D. est la même, l'expérience montrant que l'hypothèse d'après laquelle les particules chargées n'ont pas d'influence sur le fluide porteur est justifiée.

### 2.1 Lois régissant l'écoulement du fluide ionisé

L'écoulement est étudié en un régime permanent, sans frottement, à travers une tuyère dont la forme sera étudiée dans cette partie théorique. Les particules ionisées sont supposées de taille uniforme. Schématiquement (figure 1) l'écoulement se représente ainsi :

Les particules sont chargées à une position repérée  $x_1$  et elles cèdent leur charge à un collecteur situé à l'extrémité de la tuyère dont la position est repérée par  $x_2$ . Ce collecteur est relié au sol par l'intermédiaire d'une résistance de charge  $R_c$ . La région entre la position d'ionisation et le collecteur constitue la région où l'énergie de l'écoulement du fluide est transformée en énergie électrique.

On supposera que les particules ont une vitesse de glissement par rapport au fluide porteur négligeable, c'est-à-dire que leur mobilité est nulle et qu'elles n'affectent pas le comportement thermodynamique du gaz.

Ces suppositions, qui seront justifiées ultérieurement par les résultats expérimentaux, conduisent aux équations générales du problème défini par la conversion E.H.D. :

(1)  $\rho v S = \frac{dM}{dt} = \text{constante}$  (conservation de la masse)

(2)  $\sigma v S = I = \text{constante}$  (conservation de la charge)

(3)  $j = \sigma v$  (transport de charge)

(4)  $\rho v \frac{dv}{dx} + \frac{dP}{dx} - \sigma E = 0$  (conservation de moment)

(5)  $\rho v \frac{d}{dx} [ C_p T + \frac{1}{2} v^2 ] - j E = 0$  (conservation d'énergie)

(6)  $P = \rho R T$  (lois des gazs parfaits)

(7)  $\frac{dE}{dx} = \frac{\sigma}{\epsilon}$  (lois de GAUSS)

Ce système d'équations montre que le rapport charge/masse et l'entropie sont constants. De plus l'intégration de l'équation de l'énergie du système conduit à l'équation :

(8)  $C_p T + \frac{1}{2} v^2 + \left( \frac{I}{dM/dt} \right) v = \text{cte}$

qui conduit à deux types de conversion :

- la conversion à état thermodynamique constant,
- la conversion à vitesse constante.

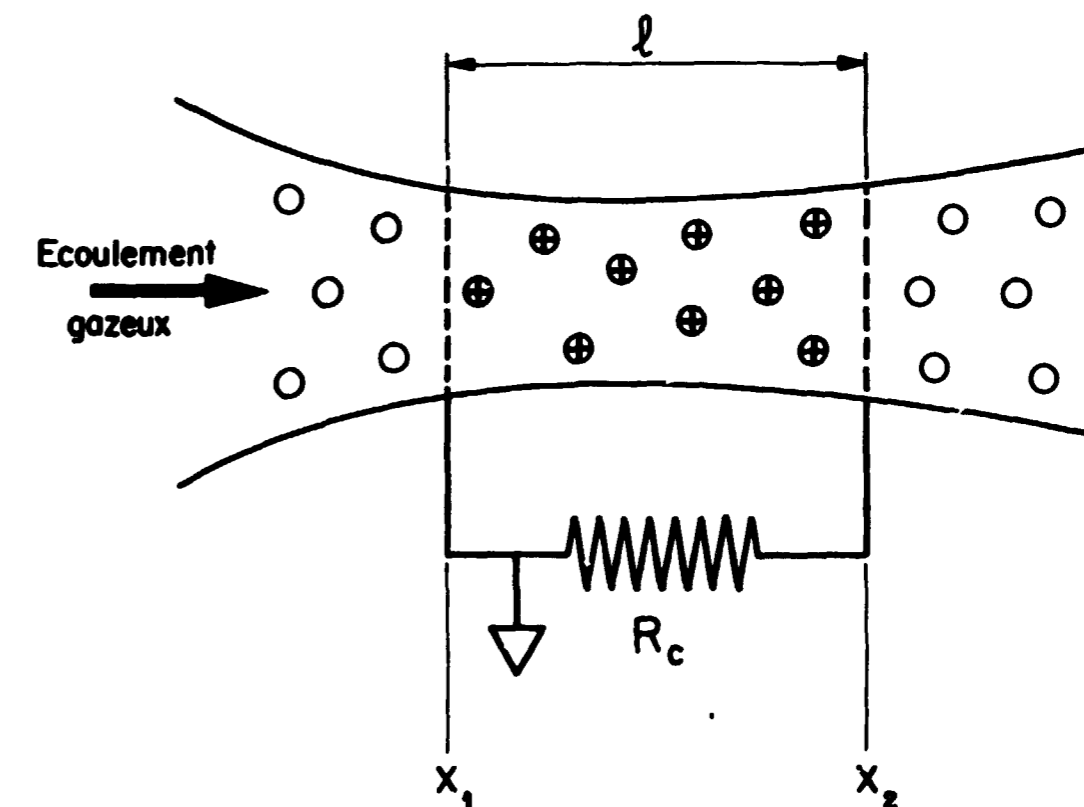


Fig:1 - Modèle théorique -

### 2.2 Conversion à état thermodynamique constant :

L'énergie électrique est obtenue grâce à la diminution de l'énergie cinétique du gaz. La détermination de la configuration  $S(x)$  est obtenue à partir de  $P = P_1, \rho = \rho_1, T = T_1$ .

Le rapport  $\frac{\sigma}{\rho}$  étant constant, la densité de charge est constante et l'équation de POISSON s'intègre immédiatement en donnant une distribution de potentiel parabolique.

Les conditions aux limites donnant :

$$V_{(0)} = 0 \text{ et } \frac{dV_{(1)}}{dx} = 0$$

on obtient :

$$(9) \quad V_{(x)} = \sigma_1 \frac{l^2}{2\epsilon} \left( \frac{2x}{l} - \frac{x^2}{l^2} \right)$$

La tension de sortie est donc obtenue pour la distance  $x = l$  :

$$(10) \quad V_{(l)} = \sigma_1 \frac{l^2}{2\epsilon}$$

On constate que  $V_{(x)}$  peut s'écrire comme la somme d'un potentiel dans un condensateur plan, auquel s'ajoute un terme dépendant de la densité de charge et de la longueur de l'espace de conversion. Soit :

$$(9a) \quad V_{(x)} = \frac{\sigma_1 l^2}{2\epsilon} \frac{x}{l} + \sigma_1 \frac{l^2}{2} \left( \frac{x}{l} - \frac{x^2}{l^2} \right)$$

Ces relations définissant  $V$  permettent d'obtenir la longueur de conversion optimale  $l_{\max}$  pour une tension de sortie maximale.

$$\text{L'équation (10) conduit à } l = \left( \frac{2\epsilon V}{\sigma_1} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Or  $V = R_c I$  et  $I = \sigma v S$ , donc :

$$(11) \quad l_{\max} = (2\epsilon S_1 v_1 R_c)^{\frac{1}{2}}$$

Cette longueur de conversion optimale est fonction de la résistance de charge et de la géométrie de la tuyère.

De même, la configuration de la tuyère s'obtient en fonction du rapport de conversion :

$$(12) \quad \eta_{th} = \frac{\text{puissance électrique de sortie}}{\text{puissance cinétique à l'entrée}} = \frac{V_{(l)} I}{\frac{1}{2} \frac{dM}{dt} v_1^2}$$

On obtient :

$$(13) \quad \left( \frac{S_i}{S} \right)^2 = 1 - \eta_{th} \left( \frac{2x}{l} - \frac{x^2}{l^2} \right)$$

Cette équation représente bien le profil de la tuyère pour une conversion E.H.D. à état thermodynamique constant. Les courbes (figure 2) montrent les variations de  $\frac{S}{S_1}$  en fonction de  $\frac{x}{l}$  pour différentes valeurs du rapport de conversion. On constate que les tuyères seront nécessairement divergentes et les variations de leurs sections augmenteront avec le rapport de conversion.

### 2.3 Conversion d'énergie à vitesse constante

La dérivée de la vitesse est alors nulle et l'on peut représenter les variations thermodynamiques en fonction du champ électrique. On obtient :

$$(14) \quad \frac{P}{P_1} = p$$

$$(15) \quad \frac{T}{T_1} = p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$(16) \quad \frac{\sigma}{\sigma_1} = \frac{\rho}{\rho_1} = \frac{j}{j_1} = \frac{S_1}{S} = p^{\frac{1}{\gamma}}$$

avec :

$$(17) \quad p = 1 + \frac{\epsilon}{2P_1} (E^2 - E_1^2) \quad (\gamma = \text{rapport de chaleurs spécifiques})$$

équations qui représentent bien les changements en pression, température et profil de la tuyère, en fonction du champ électrique.

La connaissance de  $E$  en fonction de  $x$  permettra de déterminer ces changements. La loi de GAUSS étant  $\frac{dE}{dx} = \frac{\sigma}{\epsilon}$

l'équation (16) entraîne que :



$$(18) \quad \frac{dE}{dx} = \left( \frac{\sigma_1}{\epsilon} \right) p^{\frac{1}{\gamma}} = \frac{\sigma_1}{\epsilon} \left[ 1 + \frac{\epsilon}{2 p_1} (E^2 - E_1^2) \right]^{\frac{1}{\gamma}}$$

La présence de particules chargées dans l'espace de conversion entraîne que  $E_1 > E$ , d'où :

$$-1 < \frac{\epsilon}{2 p_1} (E^2 - E_1^2) < 0.$$

Cette inégalité montre de plus qu'il existe un saut de pression et de température à partir de l'entrée dans la zone de conversion (17), et que la section de la tuyère doit augmenter à partir de cet endroit. Comme la conversion est supposée sans frottement, ces variations de température et de pression sont donc les causes de la production d'énergie électrique à la sortie de la tuyère.

La valeur de  $|E^2 - E_1^2|$  étant voisine, pour l'air, de  $10^{13} \text{ V}^2/\text{m}^2$  la valeur de :

$$a = \frac{\epsilon}{2 p_1} (E^2 - E_1^2)$$

est voisine de  $[-10^{-4}]$ .

La valeur maximale  $E_1$  de  $E$  est limitée par le champ disruptif qui est fonction de la température et de la pression ; la valeur de ce champ est linéaire avec la densité du gaz à partir de 1 atmosphère, donc avec la pression si la température est maintenue constante. La valeur de  $a \ll 1$  conduit à une pression supérieure à 1 atmosphère et à des variations de pression, température et section linéaires en  $P$ , donc en  $a$  au premier ordre près :

$$(20) \quad \frac{\Delta P}{P_1} = a$$

$$(21) \quad \frac{\Delta T}{T_1} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} a$$

$$(22) \quad \frac{\Delta S}{S_1} = \frac{-a}{\gamma} = -\frac{\Delta \sigma}{\sigma_1}$$

La densité de charge étant pratiquement constante, il est possible d'obtenir une représentation du champ et du potentiel le long de la tuyère, avec une approximation du premier ordre.

#### 2.4 Tension et puissance de sortie maximales

On a vu dans les deux cas précédents que la densité de charge pouvant être considérée comme constante, la distribution du potentiel était connue, ainsi que la tension de sortie maximale et la longueur de conversion optimale. La seule limitation à la tension de sortie est donc le champ disruptif. De ce fait, la densité de charge maximale admissible est celle qui donne le champ disruptif  $E_d$  à l'entrée de la région de conversion où le champ est maximum :

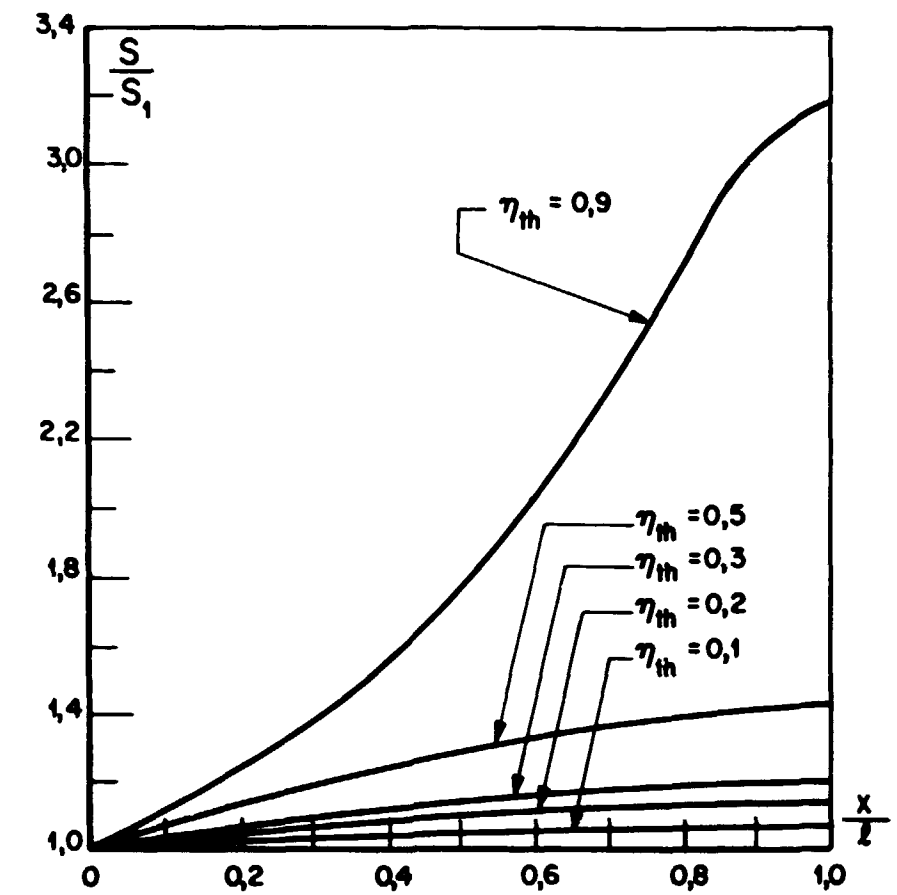


Fig: 2 - Profil de la tuyère en fonction du rapport de conversion.

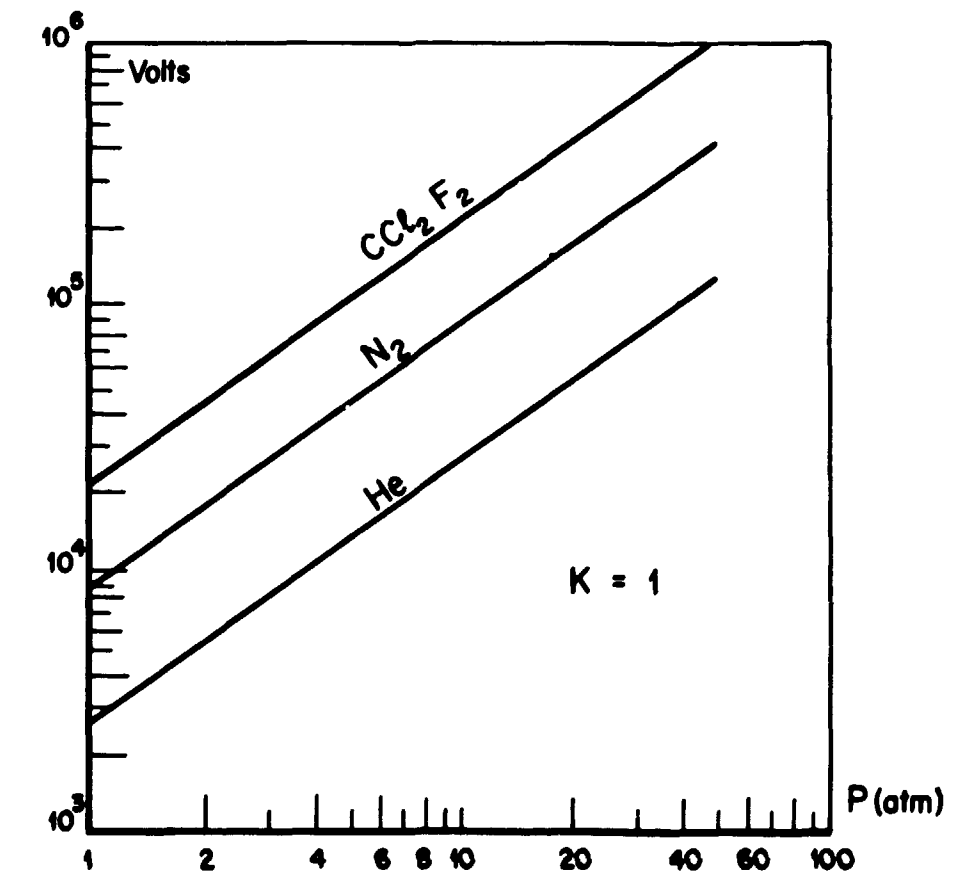


Fig: 3 - Tension de sortie maximale en fonction de la pression.

$$E_d = - \frac{dV}{dx} \Big|_{x=0} = - \frac{\sigma_{\max} l_{\max}}{\epsilon} = - \sigma_{\max} \left( \frac{2 \epsilon S_2 v_2 R_c}{\epsilon} \right)^{\frac{1}{2}}$$

d'où :

$$(23) \quad \sigma_{\max} = \frac{-\epsilon E_d}{(2 \epsilon S_2 v_2 R_c)^{\frac{1}{2}}}$$

Le courant maximal est donc  $I_{\max} = \sigma_{\max} v_2 S_2$  et la puissance de sortie maximale :

$$P_u = R_L I_{\max}^2 = R_L \sigma_{\max}^2 v_2^2 S_2^2 = \frac{1}{2} \epsilon v_2 S_2 E_d^2$$

Le champ électrique disruptif étant linéaire avec la pression, à température constante, dans cette gamme de pression, il peut être représenté par la relation  $E_d = k E_A n$  où  $E_A$  est le champ électrique disruptif dans les conditions standard pour un gaz donné,  $n$  le rapport de la pression avec la pression atmosphérique, et  $k_0$  un facteur dépendant du gaz, de la température et de la vitesse du gaz. La densité de charge étant constante, le produit  $vS$  est aussi constant et la puissance maximale peut s'écrire :

$$W = \frac{1}{2} \epsilon v S (k_0 E_A n)$$

Cette puissance variant paraboliquement avec la densité, c'est-à-dire avec la pression à température constante, comme la puissance d'entrée n'est que linéaire avec la pression, il s'ensuit que l'efficacité du générateur E.H.D. est proportionnelle à la pression d'entrée du gaz.

Les relations précédentes permettent de tracer les courbes suivantes:

$V_{S_{\max}}(P)$  (fig.3),  $\sigma_{\max}(P)$  (fig.4),  $P_u/m^3$  (fig.5) et  $\eta_{th}(P)$  (fig.6) pour le  $CCl_2$ ,  $F_2$ , l'azote et l'hélium, la longueur du générateur E.H.D. étant fixée à 6 mm et  $E_A$  étant pris dans les tables donnant le champ disruptif des gaz (18).

### 2.5 Champ électrique dans la tuyère

Les ions, étant injectés au col de la tuyère, pénètrent ensuite dans la région de conversion où ils "voient" une charge d'espace positive au-devant d'eux, due aux autres ions injectés avant eux et qui sont à tous les niveaux de conversion intermédiaires existants entre le col et le plan du collecteur. Donc ces ions voient initialement un champ de charge d'espace négative (ou champ décélérant);

cependant, comme ces ions sont transportés dans le sens du courant gazeux, ils "voient" une quantité décroissante de charges positives en face d'eux et une quantité croissante de charges positives derrière eux. De ce fait, le champ électrique dû à la charge d'espace décroît jusqu'à approximativement la moitié de la région de transport où il s'annule. Après ce point milieu, il y aura une plus grande quantité de charges d'espace derrière les ions que devant eux, de telle sorte que le champ de charge d'espace deviendra positif, ou accélérant, dans la deuxième moitié conduisant au plan de désionisation, en vertu des conditions aux limites  $E_{q0} = -E_{q1}$ . Mais la présence de la tension de sortie induira un champ négatif  $E_S$  constant dans la région de transport et, de ce fait, le champ à l'entrée du générateur E.H.D. sera maximum et négatif (figure 7).

### 2.6 Densité de charge limite - Mobilité

La charge limite s'obtient lorsque les forces de tension de surface sont compensées par la répulsion électrique [19] ; cette charge s'exprime alors par la loi de RAYLEIGH :

$$q_m = 8 \pi (\alpha \epsilon)^{\frac{1}{2}} r^{3/2}$$

$\alpha$  : coefficient de tension de surface en Newton/m et le rayon en mètres.

Mais le problème est de savoir si les particules de faibles rayons ( $0,5 \cdot 10^{-1} < r < 1 \mu$ ) produisent une densité de charge suffisante. Si l'on suppose que la concentration des particules est de  $10^{11}/cm^3$ , valeur optimale pour avoir un ensemble stable [20], la densité de charge variera entre  $10^{-2}$  et 1 Coulomb/m<sup>3</sup>. Ces densités de charge étant nettement supérieures à la valeur limite de claquage (TNP), la densité de charge obtenue sera toujours suffisante et ne sera limitée que par le champ disruptif de la charge d'espace.

D'autre part, on a supposé que les valeurs de la mobilité des particules ionisées étaient si faibles que leur vitesse de glissement  $\mu$  ne pouvait être négligée, comparée à la vitesse du gaz porteur  $v$ . Les calculs suivants vont justifier cette supposition. En effet, la mobilité  $k$  d'une particule chargée est :

$$k = \frac{q\mu}{F} = \frac{\mu}{E}$$

$F$  représentant la force extérieure s'exerçant sur la particule  $q$  étant la charge de cette gouttelette.

De façon plus détaillée, LANGEVIN [21] utilisant la théorie cinétique des gaz obtient l'expression de la mobilité d'un ion de masse  $m$  se déplaçant dans un gaz de masse moléculaire  $M$  :

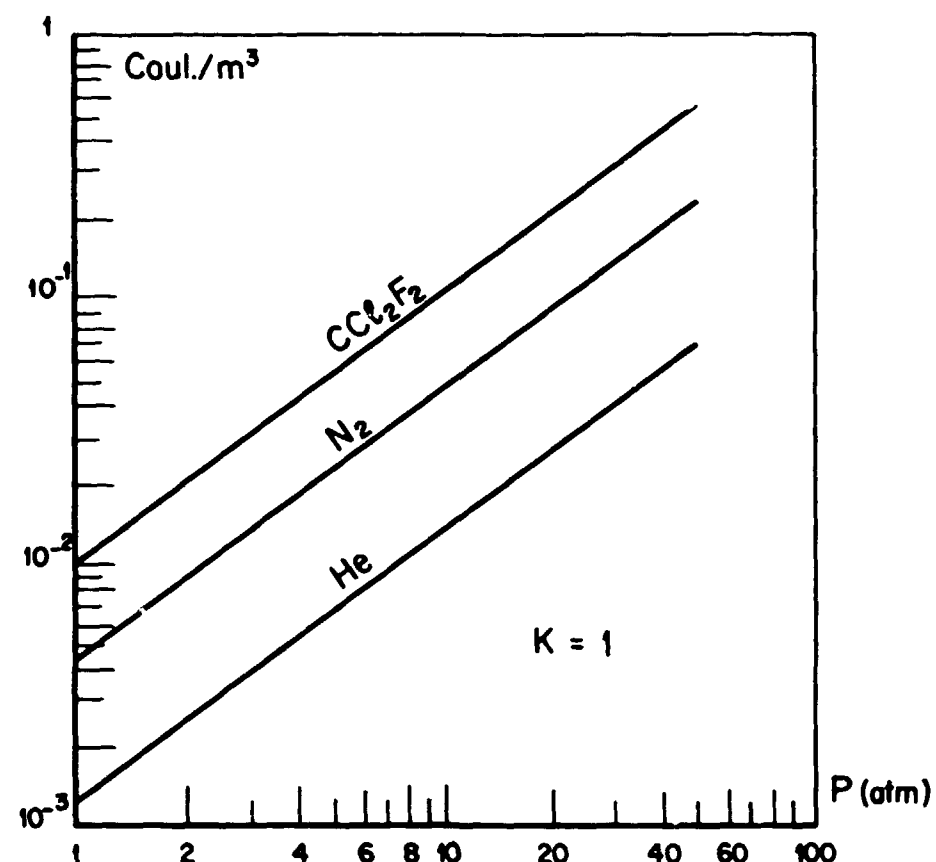


Fig:4 - Densité de charge maximale en fonction de la pression.

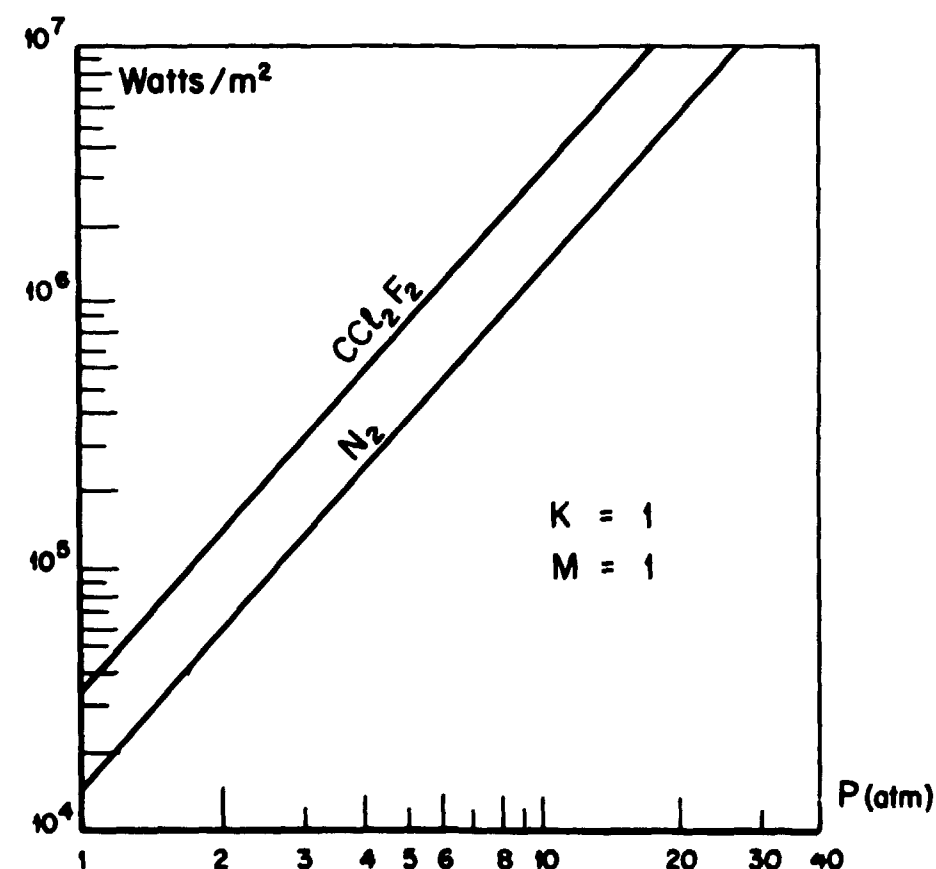


Fig:5 - Densité de puissance en fonction de la pression.

$$k = 0,815 \frac{e}{M} \frac{\lambda}{c} \sqrt{\frac{m+M}{m}}$$

$\lambda$  : libre parcours moyen des ions

$c$  : vitesse quadratique moyenne des molécules de gaz.

La figure 8 montre la mobilité en fonction de la taille des particules dans les conditions normales. Pour les gaz plus denses que l'air et à des pressions supérieures, cette mobilité est encore plus faible. La mobilité maximale  $k_m$  correspondant à la charge maximale de l'ion compatible avec le champ disruptif est donc :

$$k_m = 3 \cdot 10^{-7} \frac{m^2}{\text{volt} \cdot \text{sec}}$$

A cette valeur correspond une vitesse de glissement maximale :

$$\mu_m = k_m E_m = 3 \cdot 10^{-7} \cdot 10^7 = 3 \text{ m/s}$$

pour un champ maximum de 100 kV/cm.

Les vitesses d'écoulement du gaz porteur étant de l'ordre de Mach 1 et le critère, pour négliger cette vitesse de glissement, étant que  $\mu < \frac{v}{100}$ , nous voyons que cette vitesse de glissement, due à la mobilité des ions dans le gaz porteur, peut être négligée sans inconvénient.

La puissance utile du générateur peut d'ailleurs être exprimée en toute rigueur en fonction de la mobilité des ions. Les calculs, correspondant à l'intégration dans tout le volume du convertisseur E.H.D. de la puissance volumique des ions ( $jE$ ), conduisent à la formule finale :

$$W = + I \left[ E_S l + \frac{1}{3} \frac{(2 \pi j_0 l)^2 k l}{v_0 + k E_S} \right]$$

La faible valeur de  $k$  entraîne que  $W = I E_S l = I V_S$ , formule déjà établie précédemment.

### 2.7 Etude théorique du rendement

Une étude générale de la conversion E.H.D. se fait à partir du fluide à l'état liquide, car l'écoulement gazeux dans la tuyère est obtenu le plus souvent après la vaporisation du liquide (lorsque le fluide est à l'état liquide dans les conditions normales) suivie d'une surchauffe du gaz ainsi obtenu. L'énergie thermique du fluide est donc convertie en énergie cinétique au moyen de la

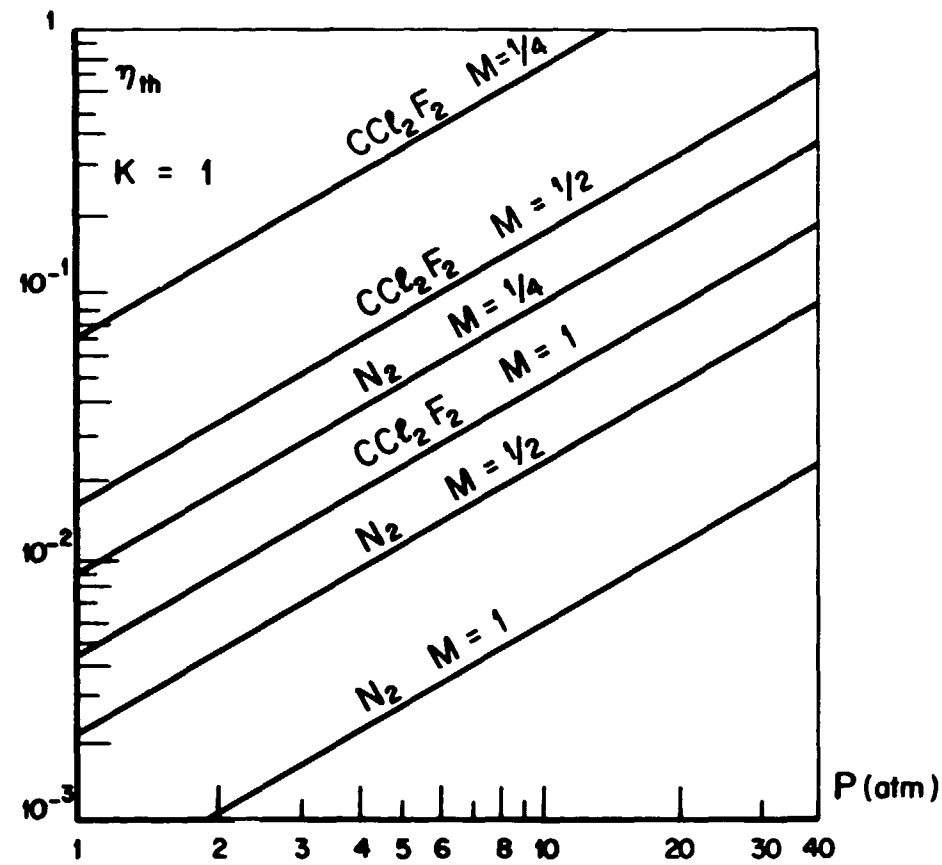


Fig: 6 - Rendement de la conversion en fonction de la pression.

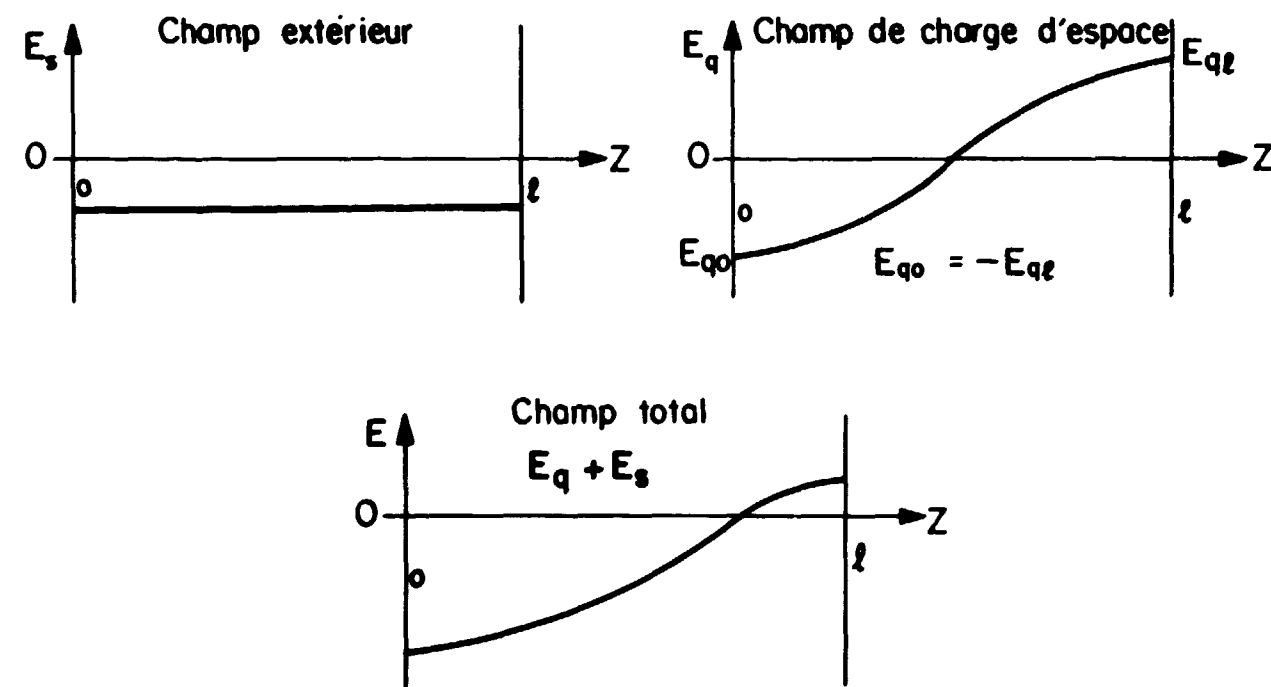


Fig: 7 - Champ électrique dans un générateur E.H.D.

tuyère, et ensuite en énergie électrique grâce au déplacement des ions en suspension dans le gaz contre le champ électrique ainsi créé. Le cycle thermodynamique est donc le suivant [22] : évaporation - surchauffe - détente - condensation. Le rendement thermodynamique idéal se calcule en faisant la répartition des énergies et en supposant un écoulement de m g/sec de gaz (cf. figure 9).

La chaleur de vaporisation est  $m L_V$

La chaleur de surchauffe est  $m C_p (T_O - T_L)$

$T_O$  étant la température de stagnation de la vapeur surchauffée

$T_L$  étant celle du liquide dans le réservoir chaud.

La détente isentropique amenant le gaz à la température  $T'_O$ , la chaleur libérée, lors du refroidissement du gaz afin d'amener totalement celui-ci à la température de liquéfaction et de le liquéfier ensuite, est :

$$m \left[ C_p (T'_O - T'_L) + L_V \right]$$

Le liquide est ensuite ramené à son état original par apport de chaleur  $m C_p (T_L - T'_L)$ .

La puissance maximale qui peut être extraite par conversion est :

$$W_m = m C_p (T_O - T'_L)$$

Le rendement thermodynamique maximum est donc :

$$\eta' = \frac{m C_p (T_O - T'_L)}{m C_p (T_O - T_L) + m L_V + m C_p (T_L - T'_L)} = \frac{T_O - T'_L}{T_O - T_L + \frac{L_V}{C_p} + (T_L - T'_L) \frac{C_p}{C_p}}$$

Malheureusement la conversion n'est pas parfaite. Seulement une partie de l'énergie récupérable est convertie, le gaz, après détente, étant à la température  $T'_O$  au lieu de  $T'_L$ . Le facteur de conversion est :

$$\eta'' = \frac{m C_p (T_O - T'_O)}{m C_p (T_O - T'_L)} = \frac{(T_O - T'_O)}{(T_O - T'_L)}$$

Le rendement théorique maximal est donc :

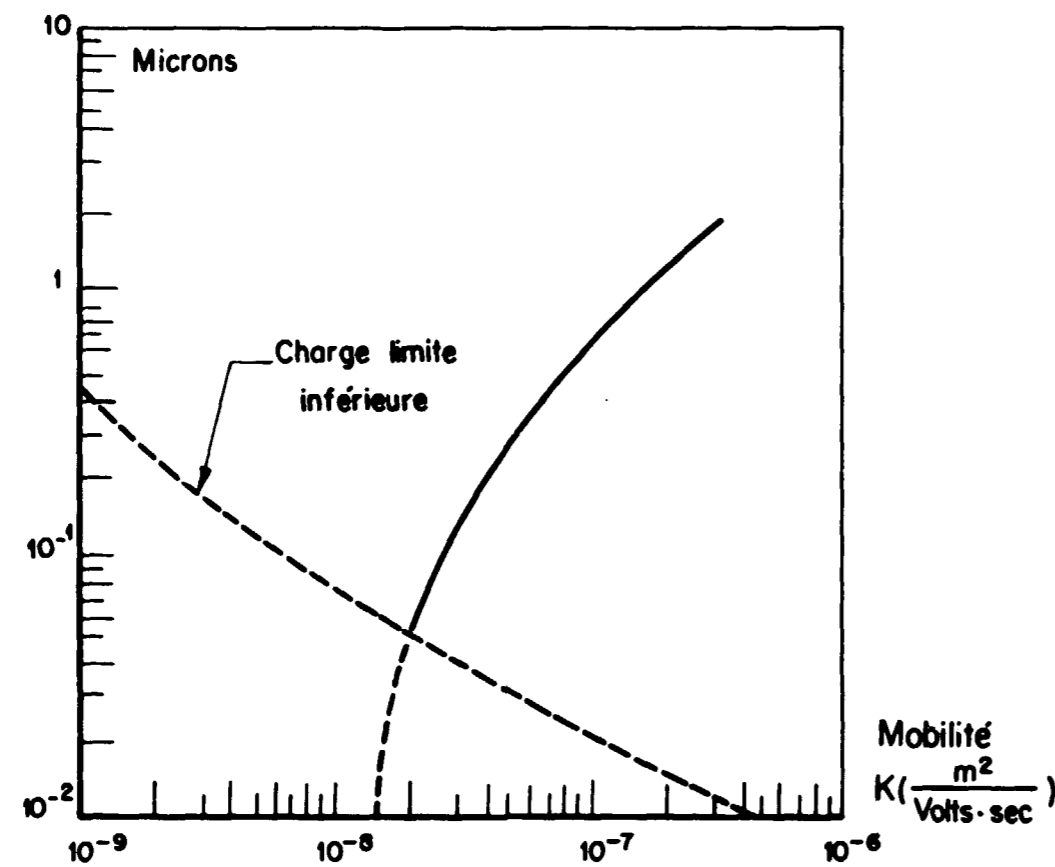


Fig: 8 - Rayon des particules en fonction de leur mobilité.

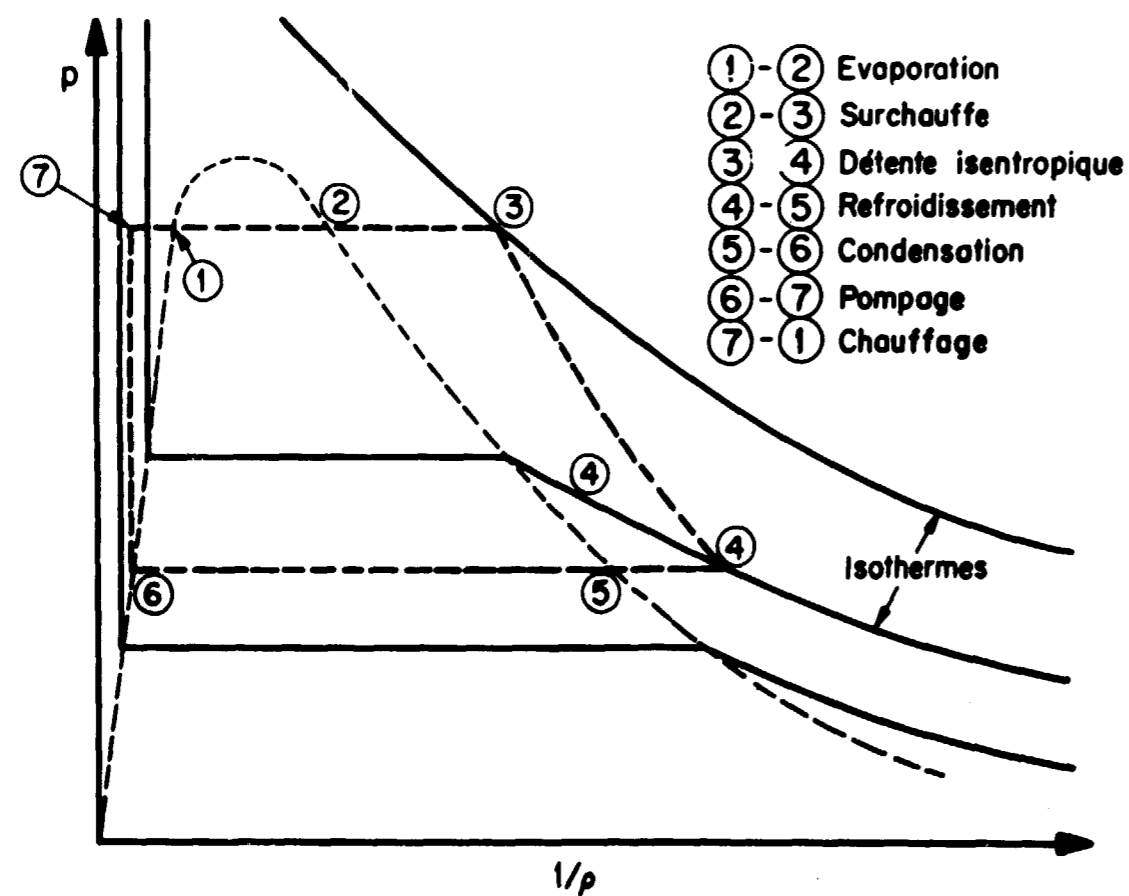


Fig: 9 - Cycle thermodynamique à 2 phases.

$$\eta = \eta' \eta'' = \frac{T_0 - T_0'}{T_0 - T_0' + \frac{L_V}{C_p}}$$

$$r C_p^L \approx C_p$$

On voit donc que ce rendement dépend du fluide par le rapport  $\frac{L_V}{C_p}$  et des températures de fonctionnement.

Dans les conditions de puissance maximale ce rendement est voisin de 33 % (à noter que la .H.D., dans les mêmes conditions, a un rendement de 50 %).

Cependant, ce rendement fait intervenir le rapport des pressions, dont dépend essentiellement le rendement d'une machine thermique, utilisant un cycle thermodynamique (cycle de BRAYTON, par exemple). Ce rendement peut s'écrire :

$$\eta = 1 - \frac{1}{p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \text{ avec } p = \frac{P_0}{P_1}$$

Ce faible rapport (maximum  $1 + 10^{-2}$ ) entraîne que le rendement réel est :

$$\eta = 1 - \frac{1}{(1 + 10^{-2})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} = 10^{-2} \frac{\gamma-1}{\gamma} < 1\%$$

Ce faible rendement s'explique par le fait qu'une fraction importante de l'énergie est perdue par frottement le long des parois de la tuyère d'une part, et par le fait qu'une autre fraction importante des molécules de gaz n'est pas condensée sur les particules ionisées, ce qui fait qu'elle ne prend aucune part à la conversion E.H.D. et que l'énergie qu'elle représente est totalement perdue.

### 2.8 Production des particules ionisées

Si le procédé le plus simple à utiliser est celui d'ARMSTRONG, par contre il offre le désavantage d'être le moins rentable. En effet, les ions sont obtenus dans la détente par le frottement des gouttelettes d'eau condensées avec le gaz et leur concentration est très faible ( $10^{-12}$  à  $10^{-10}$ ). De plus, leur mobilité est trop grande car les molécules neutres de vapeur condensable qui ne se sont pas ionisées ne peuvent se déposer sur les ions que lorsque les conditions de la détente sont idéales et que lorsque le temps de parcours entre le col de la tuyère et le collecteur est suffisamment

long. Ce procédé a donné des puissances de sortie très faibles.

Une première amélioration de ce procédé fut d'ioniser le gaz saturé de vapeur condensable, au moment de la détente ; si l'ioniseur était bien placé, de telle sorte que les gouttelettes qui se formaient subissaient instantanément l'action du champ ionisant, c'est-à-dire au col de la tuyère, dans ce cas une production d'ions plus importante avait lieu et les molécules non ionisées avaient une plus grande probabilité d'être captées au cours de leur déplacement vers le collecteur. L'ionisation se produisant par simple effet couronne, obtenu grâce à un fil ou un conducteur cylindrique creux, placé dans l'axe de la tuyère, au niveau du col et porté à un potentiel suffisant par rapport à la tuyère elle-même.

Mais le procédé le mieux adapté est l'utilisation d'aérosols chargés injectés dans un gaz dense, auquel on fait subir une détente dans une tuyère : par exemple, un mélange saturé d'air et d'eau est amené au col d'une tuyère, sous forte pression. Une décharge par effet couronne est entretenue entre un fil fin et un anneau placé au col. Les conditions de sursaturation sont obtenues au cours de la détente du mélange et une forte densité ionique est produite grâce à la condensation de la vapeur et à son ionisation. De plus, une forte condensation des molécules neutres sur les ions a lieu [23], ce qui augmente le moment de ceux-ci, et les études précises montrent que ces particules colloïdales ainsi obtenues sont toutes de taille très voisine. Ainsi, elles arrivent toutes au collecteur avec la même charge et la même énergie résiduelle, ce qui permet de placer le collecteur de façon que cette dernière soit la plus faible possible. L'avantage primordial est que, d'après la loi de **LANGEVIN**, les ions lourds ont une mobilité minimale dans le gaz porteur et ainsi l'énergie que leur communique le gaz porteur sert intégralement à la conversion E.H.D. La concentration ionique atteint  $10^{-5}$  à  $10^{-7}$ . On voit même, d'après les calculs, que l'utilisation d'un liquide porteur est encore préférable, mais cela augmente considérablement les problèmes technologiques et le rapport puissance/poids.

En conclusion, les ions colloïdaux permettent d'obtenir le meilleur rendement pour tout générateur E.H.D., à condition que la détente et l'ionisation par effet couronne se produisent au même endroit, c'est-à-dire au col de la tuyère. De plus, ces ions voient leur moment augmenter car ils servent de centre de nucléation des parties condensées au cours de la détente et leurs caractéristiques sont très voisines.

### 2.9 Fluide utilisé

Le choix du fluide dépend de très nombreux paramètres, ce qui rend la sélection très difficile. En effet, il est nécessaire que le fluide soit :

- 1°/ facilement ionisable pour avoir une forte concentration ionique,
- 2°/ d'emploi facile technologiquement parlant : le fluide doit avoir une température d'ébullition relativement faible afin que la production des vapeurs à ioniser ne soit pas un problème,

3°/ Le potentiel disruptif du fluide ionisé doit être le plus élevé possible afin que la tension de sortie du générateur E.H.D. soit elle-même très élevée. Dans le cas contraire, des décharges apparaîtraient dans le fluide, après son passage au col de la tuyère, et la tension de sortie serait partiellement court-circuitée. Le potentiel disruptif est représenté par la loi de **PASCHEN** :  $V = f(p.d)$ ,  $p$  étant la pression du fluide et  $d$  la distance entre électrodes. La présence d'un minimum dans la courbe représentative de cette loi permet de conclure qu'il est nécessaire d'utiliser le fluide avec un produit  $pd$ , soit très faible, soit élevé, c'est-à-dire avec une pression très faible ou une pression élevée pour un générateur donné.

L'étude du potentiel d'ionisation des éléments montre que les métaux alcalins sont les plus facilement ionisables [24] [25]. Certains sont difficilement utilisables car leur température d'ébullition est très élevée. Le tableau suivant permet de faire un choix entre ces métaux, l'eau, le mercure [26], etc...

Corps	Li	Na	K	Cu	Rb	Cs	Hg	CCl <sub>4</sub>	Pb (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	He	Ar
T <sub>ébull.</sub> °C	1.336	880	760	2.336	700	670	356	77	200	-253	-183	100	-269	-186
Pot Ion V.	5,37	5,10	4,30	7,70	4,20	3,88	10,40	-	-	15,4	12,5	13,0	24,5	15,7

On constate que les corps les plus facilement ionisables ne sont pas les plus simples à utiliser. C'est pour cette raison que les expériences réalisées l'ont été avec de l'eau, du mercure ou du tétrachlorure de carbone [27] [28]. Mais les expériences ultérieures semblent devoir utiliser les métaux alcalins (surtout le césium) ou l'hélium, corps déjà utilisés dans la conversion M.H.D.

## 3 - RESULTATS EXPERIMENTAUX

### 3.1 Travaux antérieurs

Si l'on ne tient pas compte des expériences préliminaires d'**ARMSTRONG** (1840) et de **A. MILHOUD** (1934) qui n'étaient que descriptives, et dont aucune conclusion n'était tirée, on se rend compte que les seules expériences sur l'E.H.D. qui furent réalisées le furent entre 1962 et 1964. La littérature, en effet, ne mentionne aucune expérience avant juin 1962 et aucune après avril 1964. Il faut sans doute voir dans ce brusque intérêt l'espoir d'applications possibles de l'E.H.D. aux problèmes spatiaux, et le fait que les expériences réalisées n'aient été suivies d'aucune expérience de grande portée s'explique par la complexité et le nombre des problèmes rencontrés. Seule une étude approfondie de tous les phénomènes intervenant dans l'E.H.D. permet d'obtenir

des résultats exploitables.

Les expériences suivantes sont donc les seules traitant de l'E.H.D. Chacune apporte quelque chose de nouveau car elles sont basées sur des principes différents pour ioniser le gaz :

- . la première utilise principalement l'ionisation apparaissant au cours de la détente.
- . la seconde utilise la détente du mercure en même temps que l'ionisation par un ioniseur.
- . la troisième utilise de l'air ionisé.
- . la quatrième, enfin, utilise un aérosol, grâce au mélange air plus eau, auquel est adjoint un ioniseur, afin que l'ionisation soit la plus complète possible.
- . la cinquième expérience utilise un liquide comme fluide porteur, mais cela pose des problèmes technologiques trop compliqués. Par contre, les résultats obtenus sont intéressants.

### 3.2 Ionisation au cours de la détente (figure 10)

Le but de cette expérience [29], la première réalisée depuis celle d'A. MILHOUD, était de produire de la vapeur de mercure en convection libre, d'introduire des gouttelettes chargées de mercure, obtenues dans la détente et avec un ioniseur, et d'extraire de la puissance électrique en soufflant le gaz chargé contre le champ électrique agissant sur les particules en sens contraire de l'écoulement. La vapeur, obtenue par chauffage, forme un jet de vapeur supersonique au col. A cette détente, qui produit des gouttelettes ionisées [30], s'ajoutent les gouttelettes ionisées par le champ ionisant produit à la sortie de l'aiguille hypodermique qui pulvérise le mercure liquide. Ces particules chargées vont ensuite se déposer sur le ballon qu'elles portent à un potentiel élevé [31]. Le mercure liquide retourne au bain par un drain.

De bons résultats ne furent obtenus qu'avec une tension de vapeur de mercure faible (cf. loi de PASCHEN), car dans le cas contraire le bas potentiel disruptif du plasma ne permettait d'atteindre que des tensions d'une centaine de Volts.

Les performances étaient :

$$V_S = 20 \text{ kV et } I = 99 \mu\text{A}$$

GOURDINE tira comme conclusion, après l'utilisation du mercure, que l'eau était le fluide idéal à cause des températures modérées d'emploi, et parce qu'il était possible d'utiliser pour la détente une pression de plusieurs atmosphères dans le réservoir. L'argon semble aussi, d'après lui,

pouvoir être utilisé avantageusement.

Les caractéristiques de la tuyère étaient :

$$S^* = 2,03 \text{ cm}^2 \quad M = 1 \quad \dot{m}^* = 2,14 \text{ g/sec} \quad T_{\text{res.}} = 450^\circ\text{C}$$

### 3.3 Convertisseur d'énergie E.H.D. Colloïdal (A.L. Cox Sept.62)

Dans ce convertisseur une étude particulière a été faite afin que les atomes neutres dans l'écoulement gazeux se condensent sur les ions et augmentent le rendement de la conversion ; c'est donc l'étude d'un générateur destiné à être considérablement transformé qui a été faite (figure 11), car ce générateur servait surtout à contrôler la croissance des ions lors de leur déplacement dans le gaz porteur.

Les caractéristiques de l'écoulement sont les suivantes :

- section au col :  $2 \text{ mm}^2$
- débit :  $2,27 \cdot 10^{-3} \text{ g/sec}$
- température :  $520^\circ\text{K}$
- pression de sortie : 1,64 mm de mercure

Les premières expériences ne donnèrent que de faibles résultats mais permirent de connaître les caractéristiques des particules. En effet, le courant moyen mesuré était de  $10^{-9} \text{ A}$  et le nombre des particules  $6,2 \cdot 10^9$  par seconde. La densité de courant dans l'écoulement était alors de  $5 \cdot 10^{-10} \text{ A/cm}^2$ , car le rapport de détente est de 100 (entre la région d'écoulement et le col). La masse d'une particule étant de  $3,6 \cdot 10^{-13} \text{ g}$  et son rayon de  $1,85 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$  le rapport charge sur masse est de  $4,4 \cdot 10^{-4} \text{ coulomb/kg}$ . L'examen au microscope électronique des ions colloïdaux de mercure déposés sur une plaque confirma ces résultats obtenus par calcul.

Le générateur fut alors amélioré et ses performances furent alors :  $I_S = 10 \mu\text{A}$ ,  $V_S = 50 \text{ kV}$ , ce qui correspond à une puissance de  $W_S = 0,5 \text{ W}$ , le rapport charge sur masse étant alors de 5 coulombs/kg.

L'étude des différents fluides utilisables pour la conversion E.H.D., en vue d'améliorer le rendement de la conversion et les performances de ce générateur, ne permet pas de conclure très nettement en faveur des métaux alcalins. En effet, ceux-ci, théoriquement, peuvent produire une plus grande densité de puissance, mais dans la détente ils produisent une quantité appréciable de noyaux non chargés. Par contre, le mercure ne produit que des particules chargées (si la détente est suffisante), mais la charge d'espace est très forte et ne permet pas d'atteindre des tensions supérieures à 50 kV.

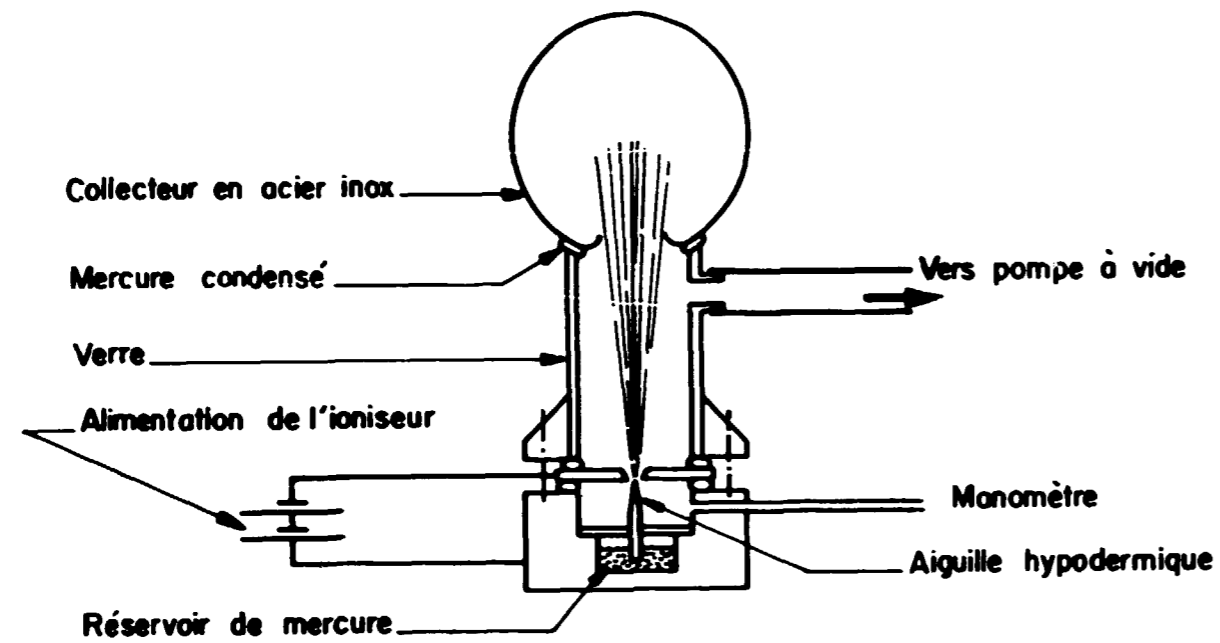


Fig: 10 - Convertisseur d'énergie E.G.D.

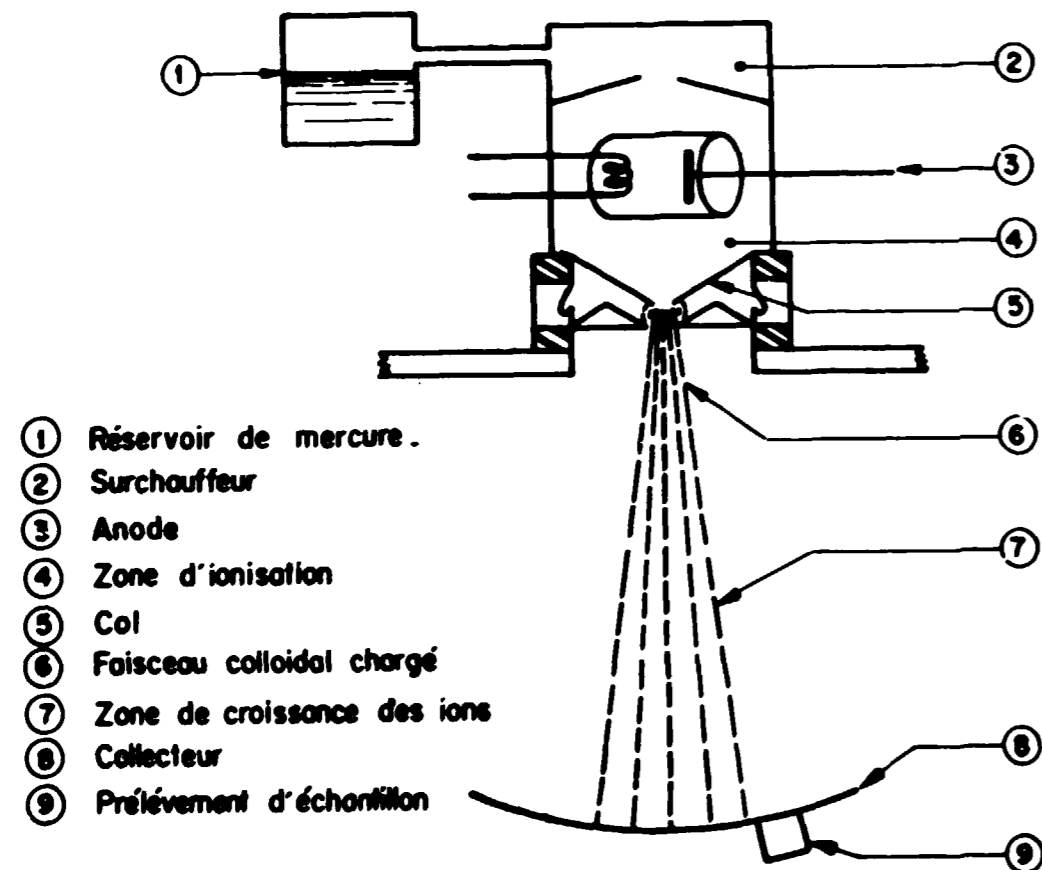


Fig: 11 - Générateur d'ions colloïdaux

Les résultats sont regroupés ci-dessous avec un collecteur de surface  $1 \text{ cm}^2$  et un rapport de détente de 100 : 1

FLUIDE	Débit mg/sec	Température du réservoir °K	Rendement de la Conversion %	Densité de puissance $\text{W/cm}^2$	Puissance spécifique kW/g
Mercure	0,271	484	53	0,049	0,18
	1,135	529	56	0,22	0,20
	2	545	57	0,40	0,20
	2,71	556	58	0,55	0,20
Potassium	0,271	795	53	0,31	1,3
	1,135	870	56	1,6	1,4
	2	902	57	2,9	1,4
	2,71	923	57	4,0	1,5
Sodium	0,271	938	54	0,75	2,8
	1,135	1027	56	3,4	3,0
	2	1069	57	6,1	3,1
	2,71	1085	58	8,4	3,1
Lithium	0,271	1380	53	4,1	15
	1,135	1509	55	18	16
	2,00	1571	56	33	16
	2,71	1605	56	45	17

3.4 Conversion E.H.D. au moyen d'un canal segmenté (KAHN - GOURDINE - Juillet 1963)

a) L'ensemble expérimental [32] est représenté par la figure T3. Un flux d'air ionisé est utilisé. La raison principale d'un tel ensemble est la recherche des paramètres définissant la conversion. En effet, le canal est diélectrique et recouvert de mylar (champ disruptif  $10^8 \text{ V/m}$ ) et des anneaux de différents diamètres sont placés à l'intérieur en différents endroits. Ainsi, ils permettent l'étude du champ axial, du champ radial, de la distribution du courant et de la concentration en ions le long du canal. La densité de puissance du gaz ionisé peut donc en être déduite.

Les figures 14-15 représentent la distribution du potentiel et de la distribution du courant le long de l'axe du canal. La figure 16 représente le courant débité par le collecteur en fonction de la position de celui-ci. Ces expériences permettent de conclure qu'une position optimale existe dans le canal, où le courant et la tension sont maxima. Cette position est fonction de la vitesse d'écoulement du fluide porteur. Dans les conditions ci-dessus la puissance débitée était :

$$W_s = 24 \cdot 10^{-6} \times 5,8 \cdot 10^4 = 1,4 \text{ W}$$



Le but des anneaux étant de confiner l'écoulement ionique dans la région intérieure des anneaux et d'éviter la migration de ceux-ci vers la paroi du canal, l'amélioration des performances du générateur au moyen de ces anneaux a prouvé le besoin de réaliser une expérience avec un canal non diélectrique segmenté comme le précédent. A Mach 2, avec de l'air simplement ionisé, un courant de  $50 \mu\text{A}$  a été produit sous une tension de 30 kV, soit une puissance de 1,5 W. Le collecteur était dans ce cas placé à 57 cm de l'entrée du canal. Les calculs conduisent à une densité de puissance de  $11,9 \text{ kW/m}^2$  et une concentration ionique de  $4 \cdot 10^{16} \text{ ions/m}^2$ .

b) Canal segmenté

Schématisé figure 17, il se compose d'anneaux en cuivre, de longueur 2 mm, distants de 5 mm les uns des autres. Les résistances  $R_1$  à  $R_{10}$  croissent de  $5,7 \cdot 10^9 \Omega$  à  $6,5 \cdot 10^{10} \Omega$ , de telle sorte que la répartition du potentiel dans le canal produise un champ uniforme le long de celui-ci (les sauts de potentiel entre les segments sont égaux). Les lectures du courant dans chaque segment furent faites, les autres segments étant mis au sol afin que la mesure ne soit pas influencée par le haut potentiel de ces segments. La répartition du potentiel obtenue fut celle de la figure 18.

De plus, la mesure du courant de chaque segment permet de mesurer la mobilité des ions. En effet, la distance  $\lambda$  entre segments est égale à :

$$\frac{\epsilon_0 \mu^2}{K J (0)}$$

quand ces segments sont mis au sol (champ axial nul). La connaissance de la vitesse du fluide porteur et du courant permet donc de connaître K. Les mesures ont donné :  $K = 1,65 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{v} \cdot \text{sec}$ . Le courant obtenu était de  $4 \mu\text{A}$  et la vitesse d'écoulement de 300 m/sec.

Dans ce genre de manipulations les causes principales des pertes sont les frottements [33]. En effet, les pertes par fuites de courant sont négligeables, car elles sont minimisées par l'emploi d'écrans. De plus, l'énergie pour produire l'effet couronne est très petite et peut être négligée aussi [34]. Parfois même cette énergie est produite par le générateur E.H.D. lui-même.

L'étude précédente montre qu'en utilisant des ions colloïdaux à la place d'ions moléculaires, la mobilité est réduite par un facteur de 100. Dans ces conditions, la conversion E.H.D. paraît être une conversion simple à réaliser et de bon rendement lorsque l'on veut convertir directement l'énergie cinétique d'un gaz en énergie électrique à haute tension.

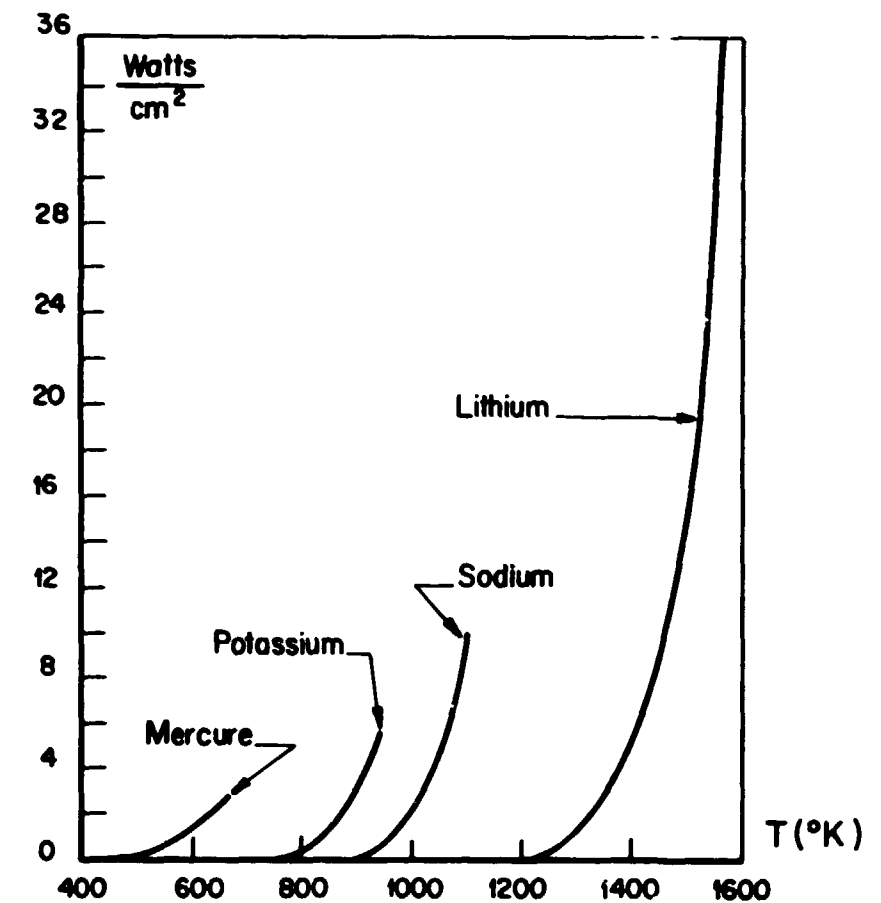
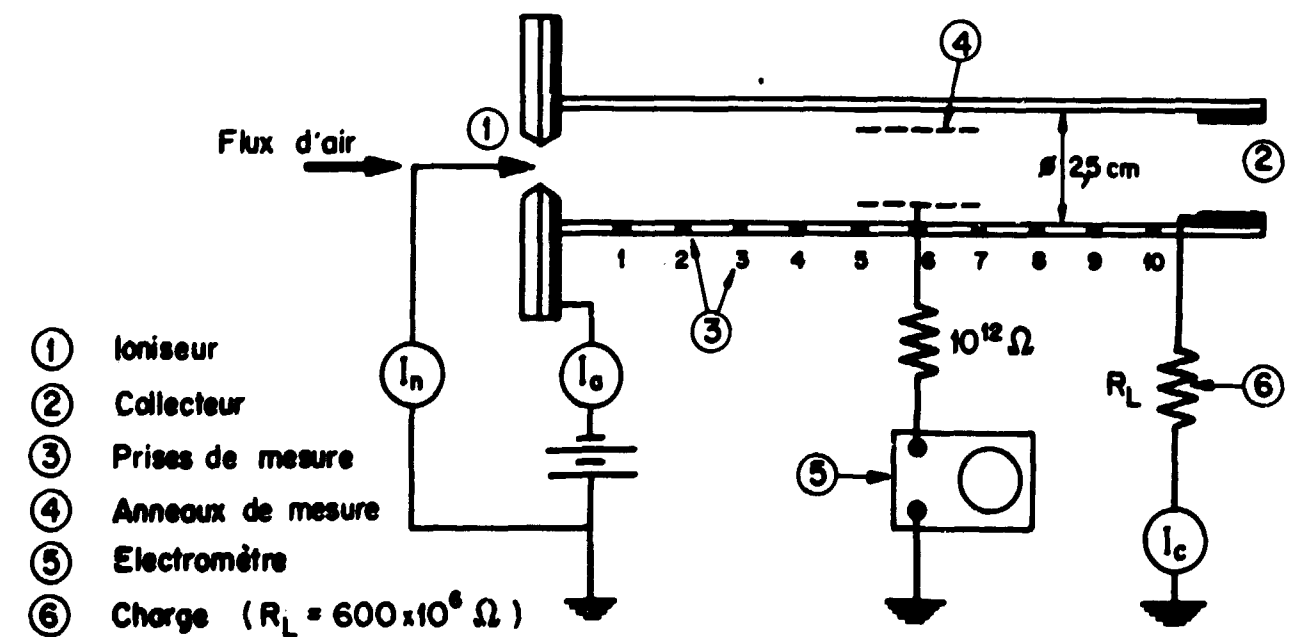


Fig: 12 \_ Densité de puissance en fonction de la température du fluide \_



- ① Ioniseur
- ② Collecteur
- ③ Prises de mesure
- ④ Anneaux de mesure
- ⑤ Electromètre
- ⑥ Charge ( $R_L = 600 \times 10^6 \Omega$ )

Fig: 13 \_ Schéma de canal diélectrique de mesure \_

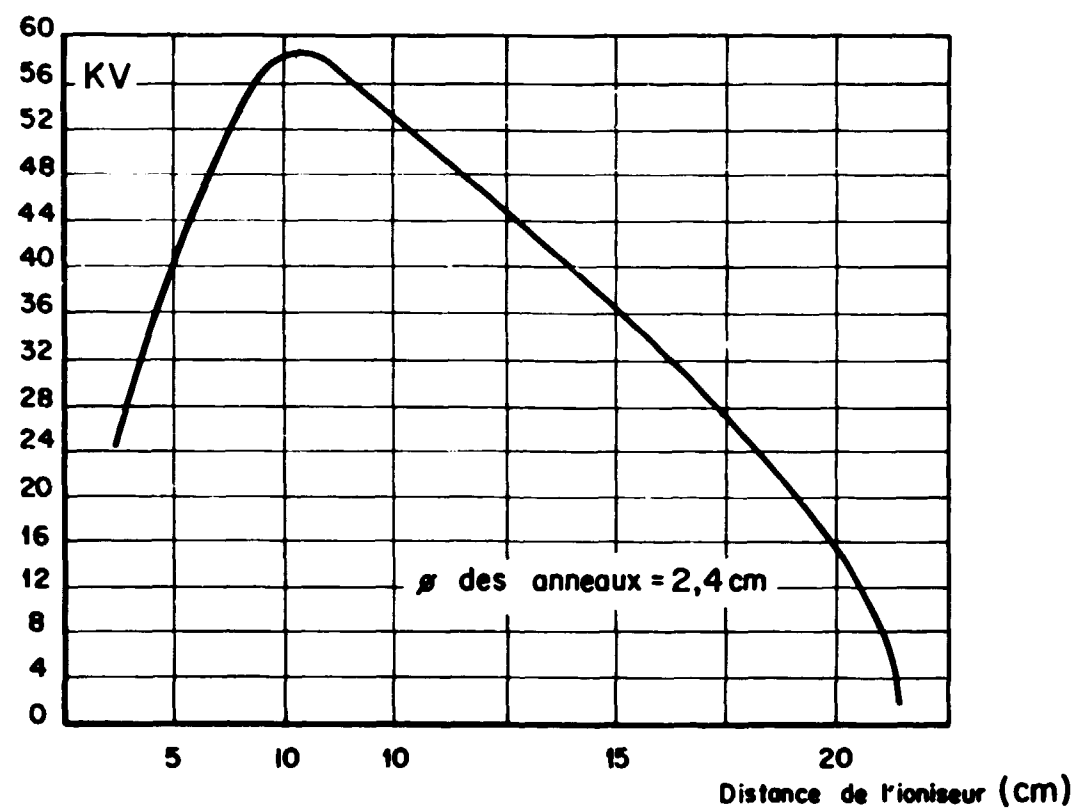


Fig:14 - Distribution du potentiel dans le canal -

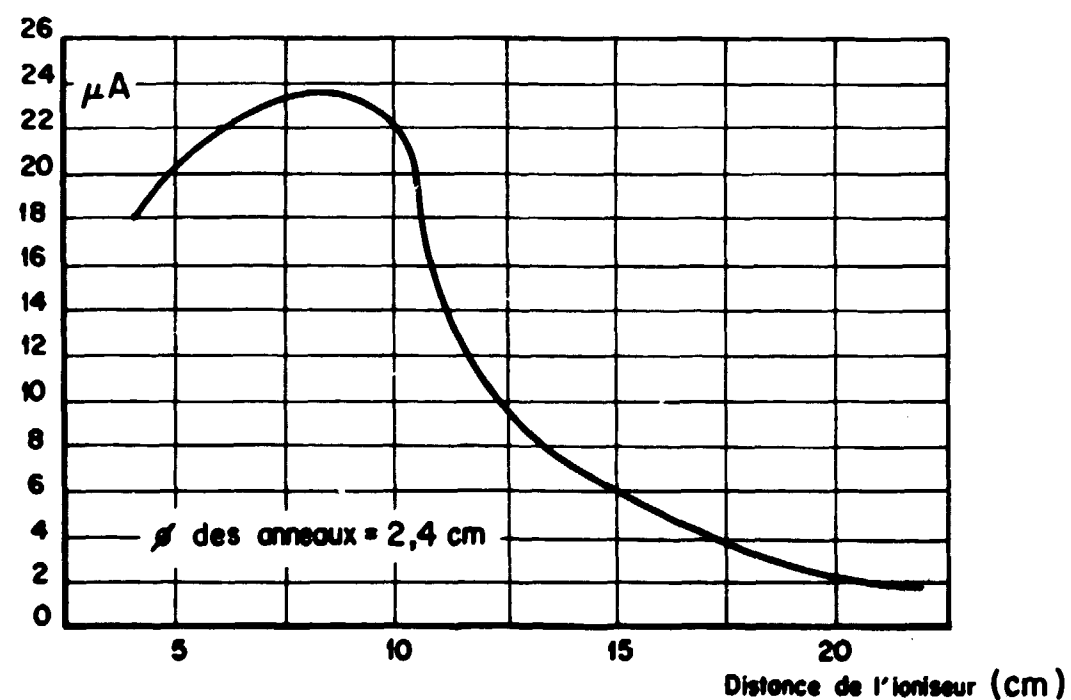


Fig:15 - Distribution du courant dans le canal -

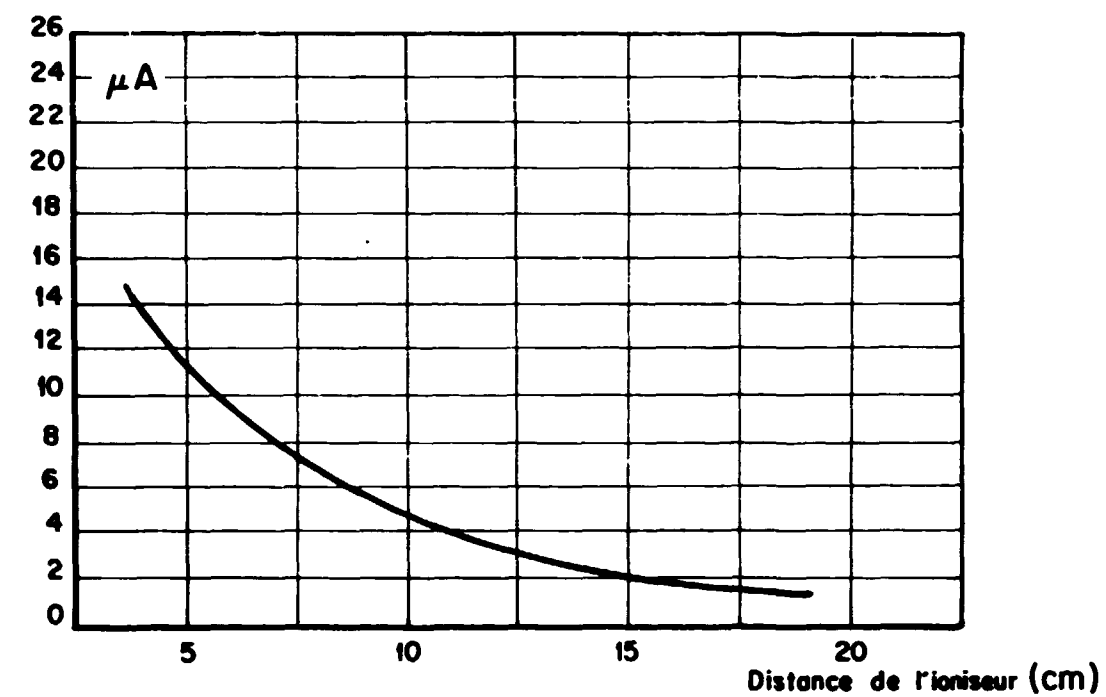


Fig:16 - Courant du collecteur en fonction de sa position -

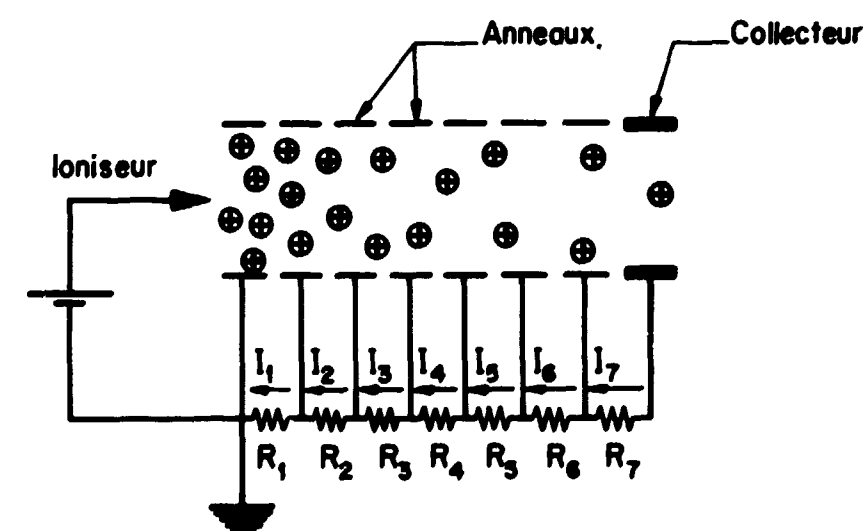


Fig:17 - Schéma du canal segmenté -

### 3.5 Convertisseur E.H.D. utilisant des aérosols

Les aérosols étant condensés et ionisés au col de la tuyère [35], sur une longueur égale au diamètre du col, les particules ionisées sont captées sur le collecteur placé dans la tuyère à une distance qui est fonction de la vitesse de l'écoulement, de la charge extérieure et de la section de la tuyère. Pour  $R_c = 3.10^8 \Omega$ ,  $M = 1$ , et  $S_{col} = 5 \text{ mm}^2$ , cette distance est de 6 mm. La figure 19 montre que, comme le prévoit la théorie (éq. 11), le rapport de conversion (puissance de sortie/ puissance d'entrée) est maximum pour une distance collecteur-col égale à 6 mm, et qu'il décroît rapidement ensuite. Les variations, linéaires avec la pression, de la tension et du courant de sortie, prévues par la théorie, sont confirmées (figure 20). De même, la variation parabolique de la puissance de sortie avec la pression d'entrée est confirmée (figure 21).

La vitesse de l'aérosol influe sur le champ disruptif. En effet, les manipulations montrent que le champ disruptif augmentait quand la vitesse de l'aérosol augmentait.

L'étude du rendement montre que celui-ci est égal à 1 %, car les pertes sont dues principalement au frottement du gaz porteur le long des parois, alors que le rendement électrique seul est égal à 83 %. Ce rendement de 83 % montre que la conversion est presque isentropique, que la mobilité des ions agit de façon négligeable et que le rendement électrique est comparable à celui d'une turbine ou d'un générateur magnétohydrodynamique. De plus, ce rendement croît si la vitesse du gaz porteur diminue pour devenir proche de 100 %.

Ce générateur permet donc de conclure que la vitesse de glissement des ions peut être négligée et que, bien que le rendement ne soit que de 1 %, cette conversion présente de nombreux avantages. En effet, cette conversion a été réalisée avec des fluides à grande vitesse, ce qui n'est pas essentiel et le rendement peut être amélioré en diminuant la vitesse du gaz porteur et en contrôlant la taille des particules qui a une importance prépondérante dans la conversion E.H.D. L'efficacité calculée du générateur à Mach 0,25 est prévue voisine de 60 %. La puissance de sortie sera alors augmentée au moyen de plusieurs étages de conversion [36], les caractéristiques des étages étant :

$$\sigma_{\max} = 0,03 \text{ coul/m}^3 \quad \frac{W}{S} = 25.10^4 \text{ W/m}^2 \quad V_{\max} = 50 \text{ kV}$$

Si l'air était remplacé par du dichlorodifluorométhane, à 40 atmosphères, les résultats seraient :

$$\sigma_{\max} = 0,40 \text{ coul/m}^3 \quad \frac{W}{S} = 30.10^6 \text{ W/m}^2 \quad V_{\max} = 1 \text{ MV}$$

mais ils seraient fortement diminués par suite de l'action du potentiel disruptif. Par contre, il est certain que les performances des générateurs actuels (6,5 Watts sous 45 kV) seraient améliorées en

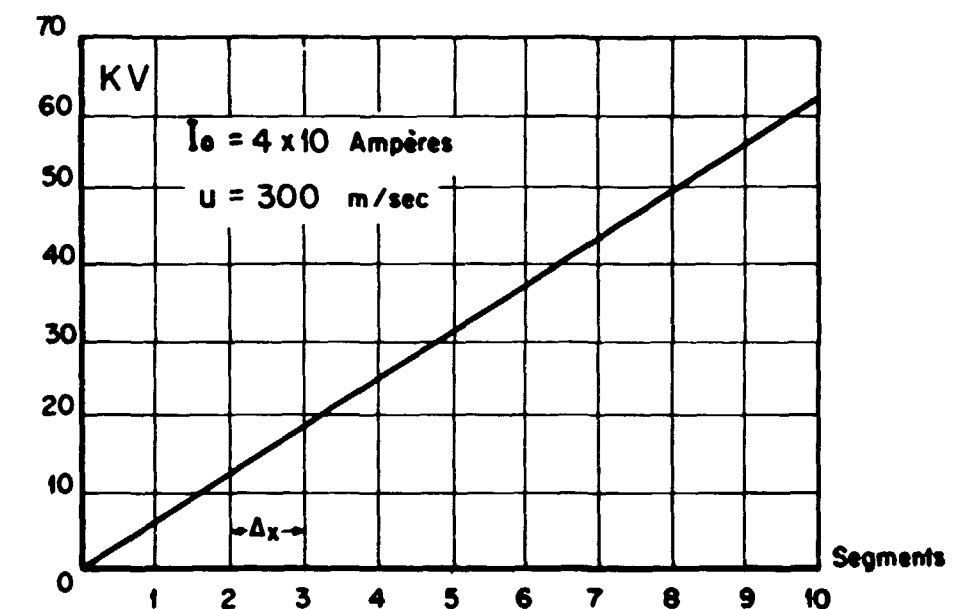


Fig: 18 - Distribution du potentiel le long de l'axe.

utilisant le mélange air-éthanol.

### 3.6 Générateur E.H.D. utilisant un liquide porteur (O.M. Stuetzer - Août 1960)

Dans cette expérience, des ions sont injectés dans un liquide isolant [37] et pompés en direction d'un collecteur. Bien que le rendement théorique (10 %) soit faible, ce système de conversion possède un nombre important d'avantages. En effet, le principe est le même que si le fluide porteur était un gaz, mais il est nécessaire d'ajouter une pompe mécanique pour assurer la circulation d'huile (1 à 10 m/s) dans la région de transport. Un ioniseur est utilisé dans les mêmes conditions, la région de transport est très courte (3 à 7 cm) et le collecteur est sphérique. Les performances de ce générateur sont remarquables : une puissance de 8 W a été obtenue avec une région de transport de 3 cm. La tension en était de 400 kV.

Les performances étaient limitées par la pompe mécanique assurant la circulation du liquide isolant. Celui-ci était, soit du kérosène, soit de l'huile de transformateur.

Le seul inconvénient est l'augmentation de poids de l'ensemble, dû au liquide et à ses auxiliaires, mais ce système permettra d'obtenir des tensions de l'ordre 1 MV avec un courant de plusieurs dizaines de microampères.

## 4 - APPLICATIONS

Les générateurs E.H.D. peuvent être employés en utilisant l'énergie solaire ou nucléaire comme source d'énergie. Ils peuvent produire la puissance nécessaire pour la propulsion électrostatique dans l'espace, ou pour les instruments de bord des satellites. Ils peuvent aussi être utilisés comme les seuls générateurs de puissance dans un système, ou en supplément à un turbogénérateur, à un générateur thermoionique, à un générateur thermoélectrique ou à un générateur M.H.D., en remplaçant le condenseur ou le radiateur. En utilisant les théories et résultats précédents, il est possible de montrer quelques applications du convertisseur E.H.D.

### 4.1 Utilisation de l'énergie solaire

Le convertisseur E.H.D. peut produire la puissance nécessaire à la propulsion ou aux instruments de bord d'un engin spatial (satellite de communication ou météorologique). Un réflecteur solaire de 2,5 m de diamètre peut être utilisé (figure 22). L'énergie solaire étant concentrée sur une petite région du générateur E.H.D., le fluide utilisé sera vaporisé et chauffé à très haute température. En supposant une densité de puissance solaire de  $0,135 \text{ W/cm}^2$  et un rendement de conversion de 60 %, 10 kW de puissance thermique pourraient être utilisés. Cette puissance serait transformée en 5,6 kW à haute tension en utilisant du lithium comme fluide de travail, chauffé à  $1.600^\circ\text{K}$  et ayant un débit de 0,33 g/sec. Le poids total de ce générateur spatial serait de 14 kg

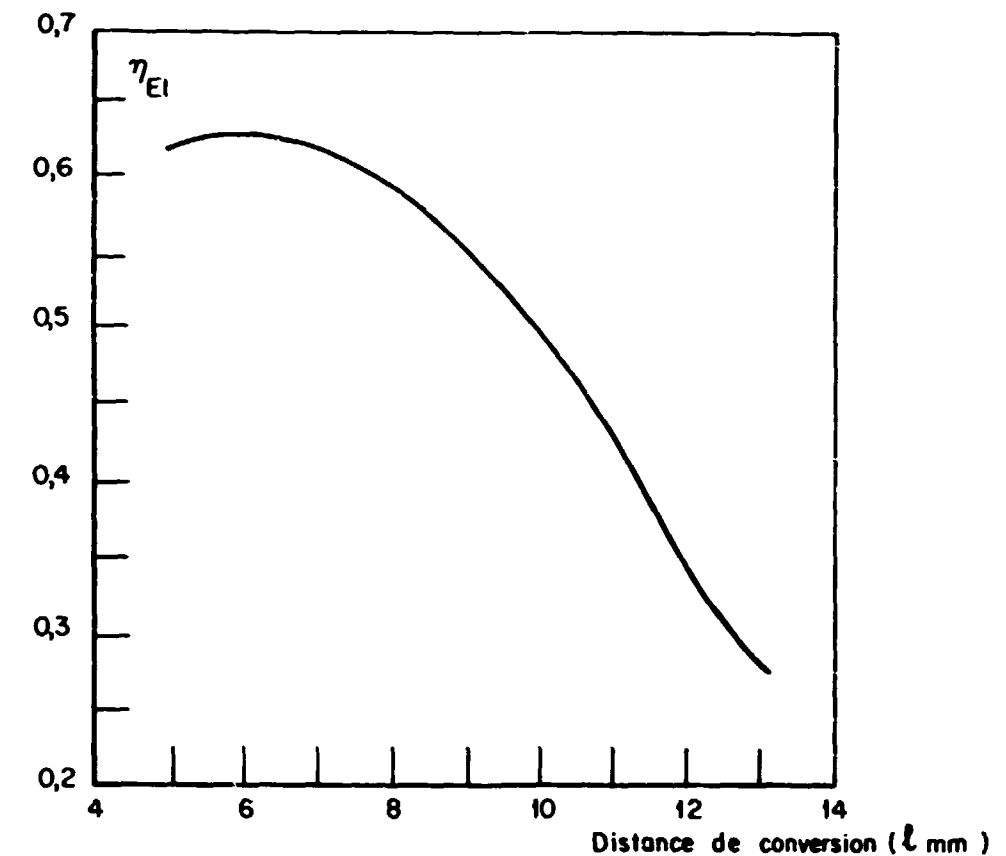


Fig:19 \_ Rapport de conversion en fonction de la distance de conversion.

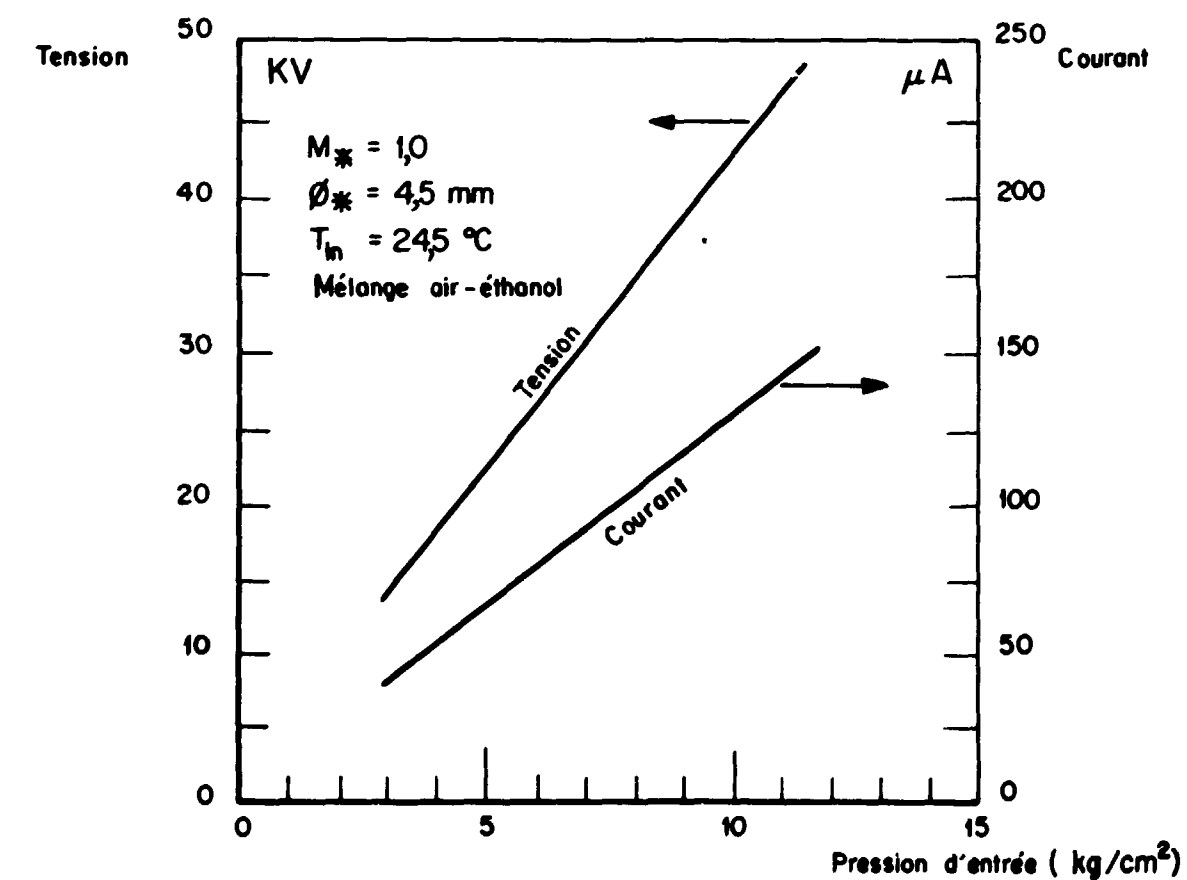


Fig:20\_ Tension et courant de sortie en fonction de la pression d'entrée.

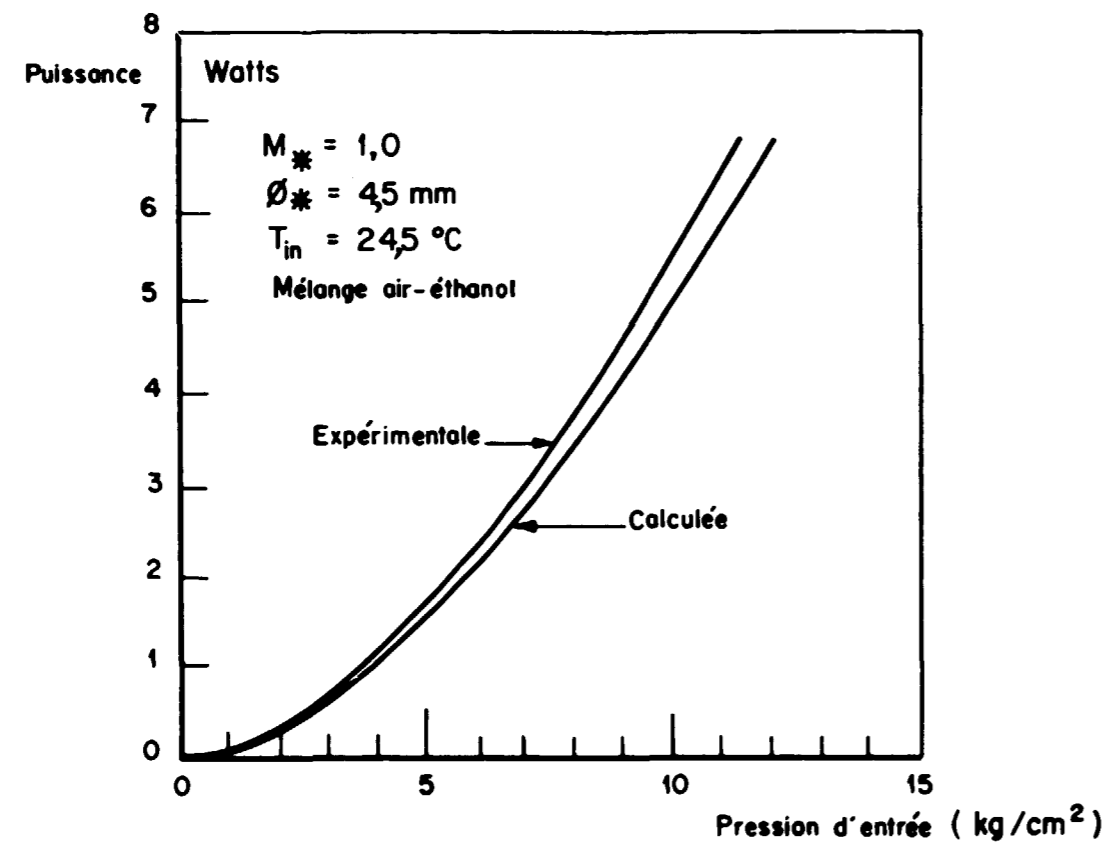


Fig:21 - Puissance de sortie en fonction de la pression d'entrée -

(dont 0,450 kg de lithium) [38].

#### 4.2 Utilisation de l'énergie nucléaire

Le générateur E.H.D. peut, dans ce cas, fournir la haute tension nécessaire aux systèmes à propulsion ionique [39] [40] (figure 23). La puissance nécessaire à la propulsion est obtenue au moyen de la conversion E.H.D. colloïdale, et si les ions utilisés sont colloïdaux, le même réservoir peut servir pour fournir l'énergie et la propulsion. Avec du sodium le système de puissance peut fournir 570 kW ; l'engin aurait alors une impulsion spécifique de 10.000 sec, avec une poussée de 1,1kgf.

#### 4.3 Couplage avec un autre générateur

Couplé avec un turbogénérateur [41], un générateur thermoionique, un générateur thermoélectrique, ou un générateur M.H.D., le générateur E.H.D. remplacerait le condenseur ou le radiateur classiques. Cette application augmenterait le rendement de l'ensemble du système par l'apport de puissance électrique sous haute tension au moment de la condensation, et serait utilisable à terre comme dans l'espace. L'avantage est particulièrement évident en application spatiale car le radiateur est remplacé par un système produisant de l'énergie, et de poids moindre.

De plus, le générateur E.H.D. peut être employé directement pour l'alimentation d'un engin à propulsion électrostatique.

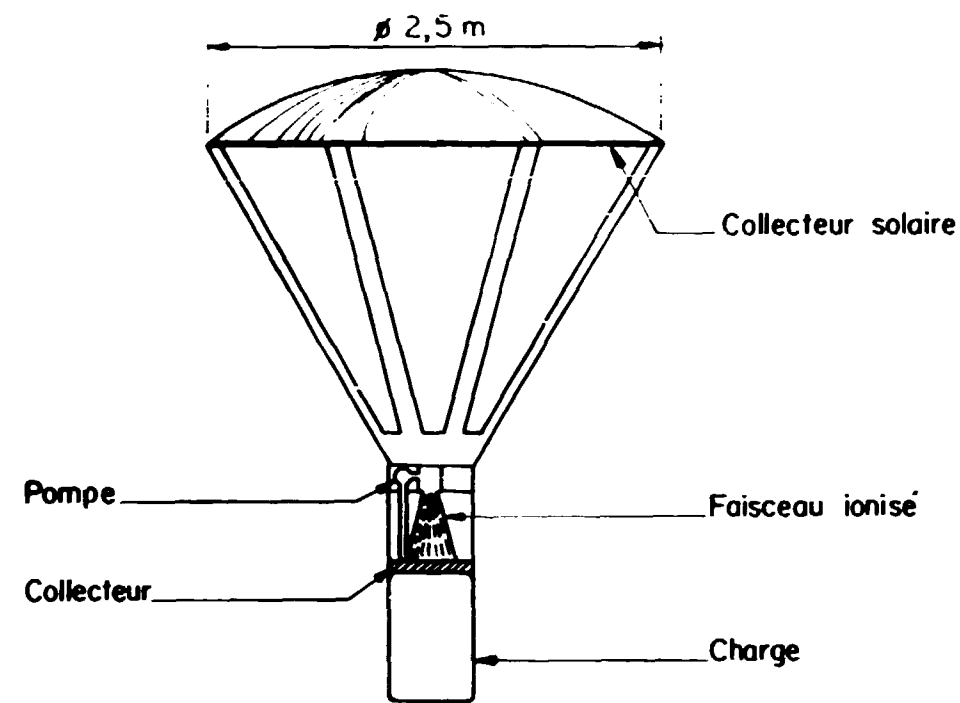


Fig: 22\_ Utilisation de l'énergie solaire \_

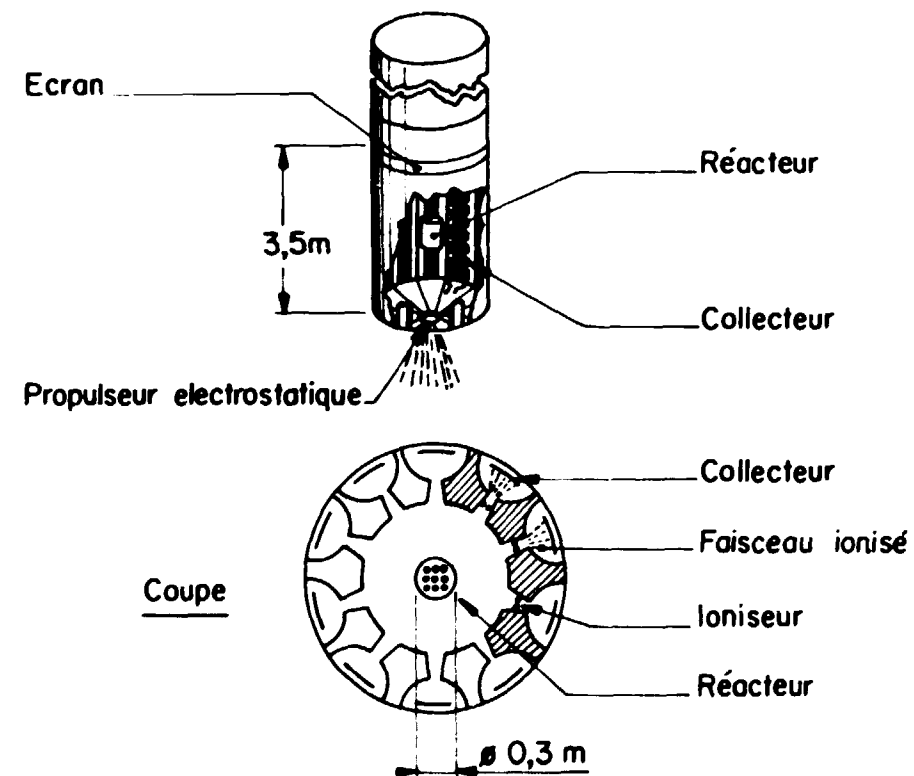


Fig: 23 \_ Utilisation de l'énergie nucléaire \_

5 - CONCLUSIONS

Cette étude montre donc que les générateurs E.H.D. actuels n'atteignent qu'une puissance maximale de 8 W sous une tension maximale de 70 kV. Mais ces générateurs étaient tous expérimentaux et leur but était de vérifier le principe de la conversion E.H.D., en utilisant un gaz pour le transport des charges ionisées. Les expérimentateurs sont tous arrivés aux mêmes conclusions : il est nécessaire d'étudier les différents paramètres de la conversion séparément d'abord, et simultanément ensuite, pour obtenir une puissance supérieure et améliorer le rendement. Pour cette raison, il serait intéressant d'entreprendre la construction de générateurs plus importants, d'une puissance maximale comprise entre 0,1 kW et 1 kW, en utilisant au maximum les résultats et les conclusions déjà obtenus. Les fluides utilisés seraient, par exemple, soit des métaux alcalins comme le sodium ou le potassium, soit l'hélium ou l'argon mélangés à du césium. Les débits seraient de l'ordre de 0,1 à 0,2 g/s et la section au col de la tuyère voisine de 5 mm<sup>2</sup>. La puissance de sortie serait, dans ces conditions, de plusieurs centaines de watts. L'étude du mélange utilisé permettrait de trouver la concentration optimale du corps, facilement ionisable, donnant le meilleur rendement. La tension de sortie serait supérieure à 50 kV.

Il est intéressant de noter que la conversion E.H.D., bien que de rendement pratique faible, présente l'avantage de ne nécessiter aucune pièce mobile ni aucun aimant (contrairement à la M.H.D.). Pour cette raison, le rapport poids/énergie produite est faible pour les unités d'une certaine puissance, et, de ce fait, le générateur E.H.D. semble être intéressant à utiliser comme générateur de puissance pour la propulsion spatiale.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. ARMSTRONG  
Sur le développement de l'électricité dans le jet de vapeur d'une chaudière  
Annales de Chimie et de Physique, 3ème série, t.VII (Avril 1843) p.401-416
- [2] M. ARMSTRONG  
Sur un développement d'électricité dans le jet de vapeur d'une chaudière  
Annales de Chimie et de Physique, 2ème série, t.LXXV (1840) p.328-33
- [3] M. FARADAY  
Sur l'électricité développée par le frottement de l'eau et de la vapeur contre d'autre corps  
Annales de Chimie et de Physique, 3ème série, t.X (Janvier 1844) p.88-104
- [4] A. MILHOUD  
Sur la force électromotrice produite par l'écoulement de la vapeur d'eau  
C.R. de l'Académie des Sciences, 30 Avril 1934, 1<sup>o</sup> semestre (T.198 n°18) p.1586-1589
- [5] A. MILHOUD  
Sur la force électromotrice produite par l'écoulement de la vapeur d'eau  
C.R. de l'Académie des Sciences, 25 Mars 1935, 1<sup>o</sup> semestre (T.200 n°13) p.1091-1093
- [6] COX A.L.  
Collotidal electrohydrodynamic energy converter  
A.R.S. Preprint 2559-62 (September 1962) and AIAA J.1 n°11 November 1963, 2491-2497.
- [7] NOGUIER  
Le générateur électrique à vapeur d'eau d'ARMSTRONG  
Revue Générale de l'Electricité (T.L. n°5) Novembre 1941, p. 314-331
- [8] BOUMANS A.A.  
Streaming currents in turbulent flows and metal capillaries  
Physica XXIII, 1007-1055 (1957)
- [9] STUETZER O.M.  
Ion drag pressure generation  
J. Appl. Phys. 30, 984-994 (1959)

- [10] MARKS A.M.  
Heat electrical power conversion through the medium of a charged aerosol  
U.S. Patent 2, 638, 555 (May 12, 1953)
- [11] SMITH J.M. and al  
Study of electrical energy conversion systems  
Aeronaut. Systems Div. TR 32-6 (April 1960)
- [12] GOURDINE M.C.  
One-dimensional electrogasdynamics  
Plasmadyne Corp. Rept. PLR-76 (August 1960)
- [13] GOURDINE M.C.  
Power generation by means of the electric wind  
Jet Propulsion Lab. TR 32-6 (April 1960)
- [14] LOEB B.L.  
Fundamental Process of electrical Discharges in gases  
J. Wiley and Sons - New York (1939)
- [15] SMITH W.P.  
Electrostatic voltage power generator  
U.S. Patent 2, 643, 349 (June 23, 1953)
- [16] VOLLRATH R.E.  
A high voltage direct current generator  
Phys. Rev. 42, 298-304 (1932)
- [17] STUETZER O.M.  
Ion transport high voltage generators  
The Review of Scientific Instruments, 32, 1 January 1961 p. 16-22
- [18] MEEK J.M. and CRAGGS J.D.  
Electrical Breakdown of gases  
Oxford - At the Clarendon Press - 1953 - p.303
- [19] PAUTHENIER M.  
Théorie de la charge électrique des poussières - Générateurs H.T. à courant gazeux  
Revue Générale de l'Electricité - 6 Mai 1939

- [20] LAMER V.K., INN E.C.Y. and WILSON I.B.  
The Method of forming, detecting and measuring the size and concentration of liquid aerosols in the size range 0,01 to 0,25 microns diameter  
J. Colloid Sci. 5, 471 - 497 (1950)
- [21] LOEB B.L.  
The kinetic theory of gases  
Dower publications Inc. - New York 1961
- [22] EPSTEIN  
Textbook of Thermodynamics  
Wiley Publications - New York 1937 p.17
- [23] FACY L.  
La capture des noyaux de condensation par chocs moléculaires au cours des processus de condensation  
Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Band 8, 3. Heft, 1955
- [24] COX A.L. and al  
Reports on propellants for electrical propulsion engines of the contact or bombardment ion type  
Rocketdyne R. 2513- 1,2 and 3, AF 33 (616) 7063 (July 1960)
- [25] Tables of Thermal Properties of gas  
U.S. Report of Com., Nat Bureau of Standards, Circular 564, 1955
- [26] KEENAN and KAYE  
Gas Tables  
John Wiley and Sons - New York
- [27] VIRGITI J.  
Etude théorique d'un transport d'ions par un courant de vapeur pour l'obtention de hautes tensions  
C.R. de l'Académie des Sciences - 9 Mai 1938 t. 206 - p. 1367 - 1369
- [28] VIRGITI J.  
Sur un générateur de hauts potentiels à transport d'ions par courants gazeux  
Revue Générale de l'Electricité - Juillet 1941 t.50 p.57-62
- [29] GOURDINE M.C.  
Study of M.H.D. and E.H.D. free-convection energy converters  
Plasmadyne Corp., S<sup>ta</sup> Anna - California - ASD - TDR 62-320

- [30] ASTRUC J.M., CHALLANDE R., GUIZOUARN L.  
Conditions de création des charges électriques dans la détente de l'anhydride carbonique, de l'hydrogène et de leurs mélanges  
C.R. de l'Académie des Sciences, t.260 - p. 3010-3013, 15 Mars 1965
- [31] STUETZER O.M.  
Ion drag Pumps  
J. Appl. Phys. 31, 136-146 (1960)
- [32] KAHN B. and GOURDINE M.C.  
Electrogasdynamic power generation  
AIAA J.2 n°8, August 1964, p.1423-1427
- [33] GOURDINE M.C., BARRETO E. and KAHN M.P.  
On the performances of electrogasdynamic generators  
Proc. of the 5th Symposium on Eng. Aspects of M.H.D. (April 1-2), 1964
- [34] LAURITSEN T.N.  
Ion production and flow in an electrohydrodynamic generator  
Air Force Institute of Technology Rept. GA/ME/62-3 August 1962
- [35] MARKS A., BARRETO E. and CHU C.K.  
Charged Aerosol energy converter  
AIAA J.2. 45-51 (1964)
- [36] LAWSON M., Von OHAIN H. and WATTENDORF F.  
Performances potentialities of direct energy conversion processes between electrostatic and fluid dynamic energy  
ARL-178, Aeronautical Research Lab., Office of Aerospace Research, USAF (December 1961)
- [37] JANNER K., MAGIM S. and SCHOPPER E.  
Z. Angew Physik 1, 446 (1955)
- [38] HAMILTON R.C.  
Interplanetary space probe auxiliary power systems  
ARS Preprint 864-59 (June 1959)
- [39] SCHULTZ R.  
Propulsion System  
U.S. Patent Office 3 157 988 - November 1964



[40] HENDRICKS

Propulsion par particules chargées : un double problème de conversion d'énergie  
A.M.U. Argonne Nat.Lab. - 6802 (November 4-5, 1963)

[41] MOLITOR J.H. and al.

Final Report, analytical studies on ion propulsion  
Rocketdyne R-2495 P, ARL-TR-60-320 (June 1960)

Manuscrit reçu le 10 Janvier 1967

LISTE DES SYMBOLES

---

$\rho$	densité du gaz
$v$	vitesse du gaz
$s$	surface de la section du canal de conversion
$j$	densité de courant
$\sigma$	densité de charge
$T$	température absolue
$C_p$	chaleur spécifique à pression constante
$C_v$	chaleur spécifique à volume constant
$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$	rapport des chaleurs spécifiques
$P$	pression du gaz
$R$	constante des gaz parfaits
$I$	intensité dans le canal de conversion
$V$	potentiel dans le canal de conversion
$l$	longueur de la zone de conversion
$E$	champ électrique à l'intérieur du canal de conversion
$\eta_{th}$	rapport de conversion (puissance électrique de sortie/puissance cinétique à l'entrée)
$R_c$	résistance de charge
$E_d$	champ disruptif
$k$	mobilité des ions
$E_A$	champ électrique disruptif dans les conditions standard
$n$	rapport pression existante/pression standard
$W$	puissance utile et maximale
$r$	rayon des particules
$\lambda$	libre parcours moyen des ions
$c$	vitesse quadratique moyenne des molécules de gaz
$u$	vitesse de glissement des ions
$L_v$	chaleur latente de vaporisation
$\epsilon$	constante diélectrique du gaz

---

FIGURES

- Fig. 1 Modèle théorique d'un convertisseur E.H.D.
- Fig. 2 Profil de la tuyère en fonction du rapport de conversion d'après MARKS A., BARRETO E. and CHU C.K., "Charged Aerosol Energy Converter", AIAA J. 2, 45-51 (1964)
- Fig. 3 Tension de sortie maximale en fonction de la pression d'après MARKS A., BARRETO E. and CHU C.K., "Charged Aerosol Energy Converter", AIAA J. 2, 45-51 (1964)
- Fig. 4 Densité de charge maximale en fonction de la pression d'après MARKS A., BARRETO E. and CHU C.K., "Charged Aerosol Energy Converter", AIAA J. 2, 45-51 (1964)
- Fig. 5 Densité de puissance en fonction de la pression d'après MARKS A., BARRETO E. and CHU C.K., "Charged Aerosol Energy Converter", AIAA J. 2, 45-51 (1964)
- Fig. 6 Rendement de la conversion en fonction de la pression d'après MARKS A., BARRETO E. and CHU C.K., "Charged Aerosol Energy Converter", AIAA J. 2, 45-51 (1964)
- Fig. 7 Champ électrique dans un générateur E.H.D. d'après SMITH J.M., "Theoretical Study of the E.H.D. generator", General Electric Rept. R 61 SD 192 AF 33 (616) 7539 (Nov. 1961)
- Fig. 8 Rayon des particules en fonction de leur mobilité d'après MARKS A., BARRETO E. and CHU C.K., "Charged Aerosol Energy Converter", AIAA J. 2, 45-51 (1964)
- Fig. 9 Cycle thermodynamique à 2 phases d'après GOURDINE M.C., "Study of MHD and EHD free-convection energy converters" Plasmadyne Corp. Rept. ASD-TDR 62-320 AF 33 (616) 8007 (Juin 1962)
- Fig. 10 Convertisseur d'énergie E.G.D. d'après GOURDINE M.C., "Study of MHD and EHD free-convection energy converters" Plasmadyne Corp. Rept. ASD-TDR AF 33 (616) 8007 (Juin 1962)
- Fig. 11 Générateur d'ions colloïdaux d'après COX A.L., "Colloidal E.H.D. Energy Converter" AIAA J. 1, 2491-2497 (1963)
- Fig. 12 Densité de puissance en fonction de la température du fluide d'après COX A.L., "Colloidal E.H.D. Energy Converter" AIAA J. 1, 2491-2497 (1963)

- Fig. 13 Schéma du canal diélectrique de mesure d'après KAHN B. et GOURDINE M.C. "Electrogasdynamic Power Generation", AIAA J. 2 1423-1427 (1964)
- Fig. 14 Distribution du potentiel dans le canal d'après KAHN B. et GOURDINE M.C. "Electrogasdynamic Power Generation", AIAA J. 2, 1423-1427 (1964)
- Fig. 15 Distribution du courant dans le canal d'après KAHN B. et GOURDINE M.C., "Electrogasdynamic Power Generation", AIAA J. 2, 1423-1427 (1964)
- Fig. 16 Courant du collecteur en fonction de sa position d'après KAHN B. et GOURDINE M.C., "Electrogasdynamic Power Generation", AIAA J. 2, 1423-1427 (1964)
- Fig. 17 Schéma du canal segmenté d'après KAHN B. et GOURDINE M.C., "Electrogasdynamic Power Generation", AIAA J. 2, 1423-1427 (1964)
- Fig. 18 Distribution du potentiel le long de l'axe d'après KAHN B. et GOURDINE M.C., "Electrogasdynamic Power Generation", AIAA J. 2, 1423-1427 (1964)
- Fig. 19 Rapport de conversion en fonction de la distance de conversion d'après MARKS A., BARRETO E. and CHU C.K., "Charged Aerosol Energy Converter", AIAA J. 2, 45-51 (1964)
- Fig. 20 Tension et courant de sortie en fonction de la pression d'entrée d'après MARKS A., BARRETO E. and CHU C.K., "Charged Aerosol Energy Converter", AIAA J. 2, 45-51 (1964)
- Fig. 21 Puissance de sortie en fonction de la pression d'entrée d'après MARKS A., BARRETO E. and CHU C.K. "Charged Aerosol Energy Converter", AIAA J. 2, 45-51 (1964)
- Fig. 22 Utilisation de l'énergie solaire d'après COX A.L., "Colloidal E.H.D. Energy Converter" AIAA J. 1, 2491-2497 (1963)

Fig. 23 Utilisation de l'énergie nucléaire  
d'après COX A.L., "Colloïdal E.H.D. Energy Converter", AIAA J. 1, 2491-2497  
(1963)

\_\_\_\_\_