

Procédé électrostatique de Pompe A Chaleur à Ecoulement Spontané

www.new-energy-paces.com

Jean-Luc BROCHET

Notez les mots clés qui vous permettront de retrouver l'adresse du site, en cas d'oubli
ou de changement d'adresse:

Pompe
Chaleur
Ecoulement
Spontané

Sur les moteurs de recherche :

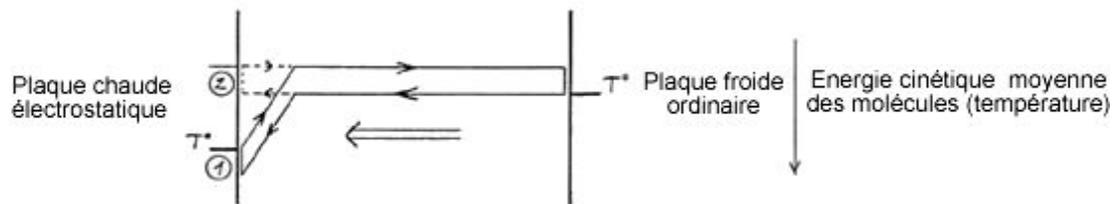
Yahoo, Google

Résumé

[Présentation et explication du principe thermodynamique](#) (voir page 5)

Il s'agit d'un nouveau procédé de pompe à chaleur, consistant à transférer de la chaleur par un gaz entre deux plaques rapprochées, grâce à un champ électrique créé à la surface de la plaque chaude dite « électrostatique » qui polarise et attire les molécules de gaz sur cette plaque, de manière à leur faire céder de l'énergie par accommodation thermique ((1) schéma ci-dessous). Les molécules se comportent comme si elles entraient en contact avec une plaque plus froide ((2) schéma ci-dessous).

Cycle thermodynamique



[Le transfert de chaleur s'effectue de la plaque ordinaire froide vers la plaque électrostatique chaude.](#) (voir page 8)

dans la limite d'une différence de température correspondant à l'accélération des molécules dans le champ d'attraction (schéma 5).

[La puissance de transfert thermique](#) (voir page 10)

est déterminée par le gradient de température dans la partie du gaz qui n'est pas soumise au champ électrique, c'est à dire la quasi totalité du volume de gaz. Aussi adopte-t-on la formule donnant le courant de chaleur par conduction thermique dans un gaz entre deux plaques de températures différentes, moyennant une modification pour la température de la plaque électrostatique T_2'

$$Q = \lambda \frac{T_1 - T_2'}{d + 2g}$$

Avec λ = conductivité thermique du gaz

d = distance de séparation des plaques

$g = 2.7$ lpm (libre parcours moyen des molécules dans le gaz).

[La raréfaction du gaz n'atténue donc pas la puissance de transfert thermique.](#) (voir page 10)

par rapport à un gaz à pression atmosphérique, tant que le libre parcours moyen des molécules n'atteint pas la distance entre les plaques. Avec des plaques espacées de 0.1 mm, la puissance de transfert n'est réduite que de 20% pour une pression de 10^{-2} bar, 75% pour 10^{-3} bar.

[Explication du principe électrostatique.](#) (voir page 11)

L'attraction de molécules par polarisation est connue dans le phénomène d'électrostriction. Elle est par ailleurs à l'origine de la formation d'hydrates de gaz rare ($Ar_n H_2O$). Dans cet exemple, les atomes d'argon se polarisent et sont attirés au voisinage du dipôle de la molécule d'eau.

[L'énergie d'accélération d'une molécule.](#) (voir page 12)

pénétrant dans le champ électrique est donnée par :

$$E_{pol} = \frac{1}{2} \infty E^2$$

Avec ∞ = polarisabilité de la molécule

E = champ électrique

C'est donc uniquement la valeur moyenne du champ électrique au contact de la plaque électrostatique qui détermine l'énergie d'accélération des molécules. Un tableau donne l'énergie d'accélération d'une molécule pour quelques gaz, et l'échauffement correspondant.

[Description technique de la plaque électrostatique.](#) (voir page 13)

Dans le modèle de référence, le champ électrique est produit dans les trous d'une grille en contact avec le gaz. La grille constitue l'armature positive d'un condensateur, et elle est séparée de la cathode par une couche diélectrique mince (schéma 20). La dimension des trous est réduite autant que possible pour éviter tout problème de claquage dans le gaz, lié au champ électrique nécessairement très intense.

[Pour obtenir un écart de température suffisant.](#) (voir page 15)

entre la source froide et la source chaude, la solution consiste à procéder par étages, c'est à dire à superposer les plaques en mille-feuille, la plaque froide d'un étage devenant la plaque chaude de l'étage suivant. (Voir « Configuration d'ensemble »)

[Un calcul de la puissance électrique consommée.](#) (voir page 16)

montre que celle-ci est négligeable par rapport à la puissance de transfert thermique, ce qui permet d'espérer un coefficient de performance (COP) très élevé, sans rapport avec le COP de Carnot.

[Différentes configurations possibles.](#) (voir page 16)

sont passées en revue avec pour objectif de simplifier le procédé de fabrication, de réduire le coût de production, mais aussi d'optimiser le puissance et la fiabilité, en particulier en essayant d'éliminer le risque de détérioration du diélectrique lié au champ électrique très intense à mettre en œuvre.

[La contradiction avec le principe de Carnot est examinée.](#) (voir page 20)

L'absence de travail nécessaire à fournir dans le procédé s'explique très simplement par le fait que chaque molécule est accélérée en arrivant sur la plaque, puis ralentie selon la même valeur d'énergie lorsqu'elle repart. $W_1 - W_2 = 0$. Le champ électrique ne fournit aucune énergie aux molécules qu'il ne puisse récupérer. L'énergie est continuellement donnée et reprise aux molécules de gaz dans leur va-et-vient entre les plaques. (Voir « Avantages de l'invention »)

[Les applications](#) (voir page 24)

sont d'abord celles des pompes à chaleur actuelles, avec un intérêt fortement accru par le coefficient de performance élevé. D'autres applications spécifiques découlent de ce coefficient de performance élevé, qui sont autant d'inventions venant se greffer sur le procédé de base. Il deviendrait en effet possible de refroidir l'environnement, par exemple l'eau d'une rivière ou d'un fleuve, pour produire du travail, par exemple de l'électricité (page 25) ou encore refroidir de l'eau de mer pour produire à la fois de l'électricité et de l'eau douce (page 27). Il devient également envisageable de produire des générateurs thermoélectriques pouvant remplacer avantageusement les générateurs actuels, ainsi que les groupes électrogènes, et même les batteries et les piles pour certaines utilisations (page 29).

[Trois possibilités d'expérience sont décrites.](#) (voir page 31)

ainsi qu'une expérience préliminaire assez simple à réaliser pour mettre en évidence la variation de température dans un gaz soumis à un champ d'accélération (pages 39 à 43).

Des explications supplémentaires sont introduites

pour une meilleure assimilation du principe thermodynamique :

- 1) [Illustration du principe par l'expérience de Joule](#) (voir page 44)
- 2) [Comparaison du procédé avec une pompe à chaleur basée sur une diode vide. La comparaison est élargie aux pompes à compression mécanique.](#) (voir page 45)

[Lettre aux lecteurs.](#) (voir page 48)

Pourquoi une invention sur internet.

Renseignements sur les brevets.

[Forums où la PACES est discutée](#) (voir site)

[Sites équivalents en version étrangère](#) (voir site)

Procédé électrostatique de pompe à chaleur à écoulement spontané

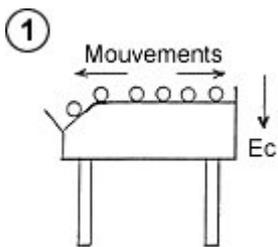
Dans un gaz soumis à un champ d'attraction, comme par exemple le champ de pesanteur terrestre, existe une variation de pression, mais aussi de température, dont le gradient est parallèle au champ d'attraction. Ainsi dans l'atmosphère, la température baisse au fur et à mesure que l'on s'élève en altitude.

Par conséquent, si l'on met en contact thermique deux plaques par l'intermédiaire d'une mince couche de gaz horizontale dans laquelle règne un champ d'attraction très intense, une différence de température va se créer entre les deux plaques, la plaque supérieure cèdera de la chaleur et se refroidira, tandis que la plaque inférieure se réchauffera en absorbant cette chaleur. La chaleur s'écoulera spontanément d'une plaque à l'autre par conduction thermique dans le gaz, c'est à dire sans fournir de travail.

Principe thermodynamique de la pompe

Il consiste à transférer de la chaleur par un gaz entre deux plaques rapprochées de températures différentes, de la plaque froide vers la plaque chaude, grâce à un champ électrique créé à la surface de la plaque chaude dite « électrostatique » qui attire les molécules de gaz pour leur faire céder de l'énergie par accommodation thermique. En pénétrant dans le champ électrique, chaque molécule est attirée et voit son énergie cinétique augmenter, ce qui entraîne une augmentation de la température de la plaque par contact avec les molécules chaudes.

$E_c = 3/2KT$ (pour un gaz monoatomique ou gaz rare)



Une manière imagée de se représenter le phénomène escompté consiste à remplacer les molécules de gaz par une multitude de boules de billard en mouvement sur une table, laquelle comporterait un « fossé » à l'un des deux bords (schéma ci-contre). Pour que l'image soit juste, il faut faire abstraction des pertes d'énergie qui tendent à réduire le mouvement, comme par exemple le léger frottement des boules sur le tapis, ainsi que la perte d'énergie dans les chocs (les boules s'échauffent très légèrement dans un choc, d'où une perte globale d'énergie cinétique des boules après un choc).

On pourrait ainsi constater que l'énergie cinétique moyenne des boules qui frappent le bord gauche, en bas du fossé, est supérieure à l'énergie cinétique moyenne des boules sur la partie horizontale de la table, chaque boule qui pénètre dans le fossé voyant son énergie cinétique augmenter d'une valeur correspondant à l'énergie potentielle de la boule dans cette dénivellation. L'énergie cinétique moyenne pouvant être assimilée à la température, il vient que la température des boules frappant le bord gauche est supérieure à la température des boules frappant le bord droit.

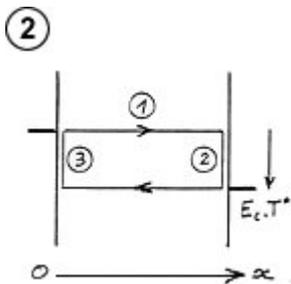
N.B.: Conformément à cette représentation, il m'a paru judicieux, sur tous les schémas, d'élever la température vers le bas, un niveau plus bas sur le schéma correspondant à une température plus élevée.

Principe de l'accommodation thermique

Transfert thermique entre deux plaques ordinaires de températures différentes

Pour simplifier la représentation, imaginons deux plaques rapprochées de températures différentes, avec du gaz raréfié entre les deux de manière à ce que les molécules oscillent entre les deux plaques généralement sans collision avec d'autres molécules, et observons l'une d'elles, d'abord quand celle-ci se déplace vers la plaque droite ((1) schéma ci-contre).

(le cycle fléché indique le sens du déplacement de la molécule et son niveau énergétique selon la position sur l'axe Ox entre les plaques. Un trait horizontal signifie seulement que la molécule se déplace à vitesse et énergie constante entre les plaques).



En arrivant sur la plaque de droite plus chaude, la molécule adapte son énergie cinétique à la température de la plaque, en l'occurrence elle va se réchauffer en rebondissant à une vitesse supérieure après avoir puisé de l'énergie sous forme de chaleur sur la plaque ((2) schéma ci-contre). Le phénomène est connu sous le nom d'accommodation thermique.

Plus précisément, lorsqu'une molécule, à une température T_i , frappe une surface à une température T_s , il y a un échange d'énergie et la molécule est réémise à une température T_r intermédiaire. On définit un coefficient d'accommodation, qui est le rapport de l'énergie moyenne réellement échangée à l'énergie qui serait échangée si les particules réémises atteignaient un équilibre thermique parfait avec la paroi.

$$a = \frac{T_r - T_i}{T_s - T_i}$$

Généralement a est compris entre 0,4 et 0,85 .

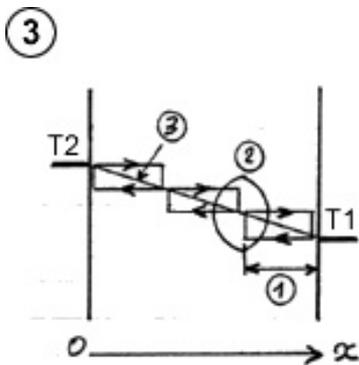
Le coefficient a dépend surtout de la nature du gaz, il est élevé pour des gaz de masse moléculaire élevée, (ce qui est le cas dans l'invention) (source d'information : Techniques de l'ingénieur B4020)

L'effet inverse se produira au contact de la plaque de gauche plus froide, la molécule rebondissant à une vitesse inférieure après avoir cédé de l'énergie

sous forme de chaleur sur la plaque ((3) schéma 2). Cet échange multiplié par la fréquence considérable d'aller retours, puisque la vitesse moyenne d'une molécule de gaz est de l'ordre de 400 à 500 m/s, ainsi que la densité considérable de molécules dans un gaz, a pour effet d'égaliser progressivement la température des deux plaques.

Influence de la pression gazeuse sur la puissance de transfert

Avec une pression (ou densité) correspondant à un libre parcours moyen (lpm - parcours sans collision) supérieur à la distance entre les plaques, c'est à dire un gaz raréfié, une petite variation de pression engendre une variation du nombre de « transporteurs d'énergie » que sont les molécules, et par conséquent une variation de la puissance de transfert thermique.



Pour une pression correspondant à un libre parcours moyen inférieur à la distance entre les deux plaques, c'est à dire un gaz dense, des collisions ont lieu au sein du gaz, et ce d'autant plus que la densité est forte (le libre parcours moyen dans un gaz d'argon à pression atmosphérique est de 50 nanomètres, soit 0,05 micron). Comme cela est représenté symboliquement sur le schéma ci-contre, ces collisions raccourcissent les cycles thermodynamiques moléculaires (1), mais elles tendent aussi à

égaliser l'énergie moyenne des molécules après le rebond (2) ce qui diminue la différence d'énergie cinétique moyenne, sur un plan donné entre 0 et x, entre les deux sens de déplacement des molécules. La fréquence des échanges d'énergie contre les parois augmente toujours proportionnellement avec la pression, mais cette augmentation de fréquence est compensée par une diminution de l'énergie échangée par un choc. Pour reprendre l'image des « transporteurs d'énergie », le nombre de transporteurs augmente continuellement avec la pression, mais lorsque le libre parcours moyen est plus petit que la distance entre les plaques, cette augmentation est compensée par une diminution de leur charge, d'où un débit énergétique constant. La puissance de transfert thermique ne varie donc plus avec la pression, ce que confirme la formule suivante :

$$Q = \lambda \frac{T_1 - T_2}{d + 2g}$$

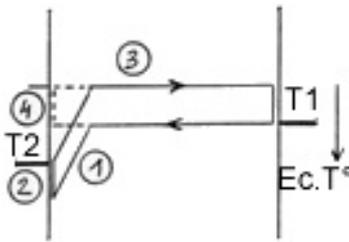
Avec λ = conductivité thermique du gaz
 T_1, T_2 = température des plaques
 d = distance de séparation des plaques
 $g = 2,7$ lpm pour les gaz lourds

On voit dans cet exemple que la température dans le gaz varierait selon la position sur l'axe Ox entre les plaques, selon un gradient ou une pente thermique ((3) schéma 3). La représentation symbolique de trois cycles signifie surtout que la température du gaz, comme dans un gaz raréfié, est liée au sens de déplacement des molécules. Mais

il serait plus correct, pour représenter la température selon le sens de déplacement, de tracer deux droites parallèles à la pente thermique, car les collisions s'effectuent à tous les niveaux selon l'axe Ox. La séparation en trois cycles juxtaposés suggère que dans un gaz dense les choses se passent comme s'il y avait des cloisons ou des films hyperminces disposés parallèlement aux plaques, le libre parcours moyen correspondant à la distance entre ces cloisons.

Introduction d'un champ d'attraction

④



Pour simplifier la démonstration, on reprend le cas du gaz raréfié. Supposons que la molécule, en parvenant à proximité de la plaque de gauche, dite « électrostatique », pénètre dans un champ d'attraction électrique. Cela se traduit sur la courbe thermo-énergétique par un fossé ((1) schéma ci-contre) à l'image de la table de billard représentée plus haut.

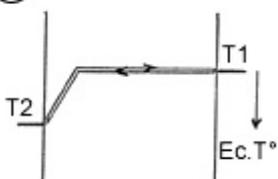
Ce champ d'attraction augmente l'énergie cinétique de la molécule et va la porter à une température supérieure à celle de la plaque (dans la limite d'une différence de température entre les plaques correspondant à l'énergie potentielle du champ d'attraction).

Par accommodation thermique, elle va céder de l'énergie au contact de la plaque (2) et repartir à une vitesse inférieure.

Pour repartir, la molécule doit « remonter » le champ d'attraction, et perdre autant d'énergie cinétique qu'elle en a gagné en « tombant ». Le résultat final est un refroidissement de la molécule (3), bien qu'à l'origine, avant de pénétrer dans le champ d'attraction, elle était plus froide que la plaque qu'elle allait rencontrer. Ce refroidissement sera identique à celui qu'elle aurait subi sur une plaque ordinaire, avec un écart de température identique entre la molécule et la plaque au moment du contact (4).

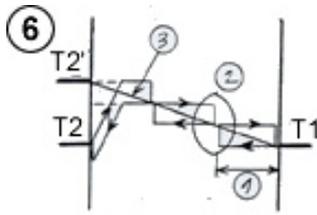
N.B : Il convient à présent de noter que, l'énergie potentielle du champ d'attraction n'étant équivalente qu'à une petite fraction de l'énergie cinétique moyenne des molécules (quelques dizaines de degrés au mieux, comparé à la température ambiante qui est d'environ 300 Kelvins), elles ont très peu de chance d'être piégées et n'ont pas besoin de récupérer de l'énergie thermique sur la plaque pour sortir du champ d'attraction, ce qui bien entendu annulerait l'effet escompté. Pour prendre une comparaison, une voiture passant dans un nid de poule n'est pas que légèrement freinée, et n'a pas besoin de la puissance du moteur pour en sortir.

⑤

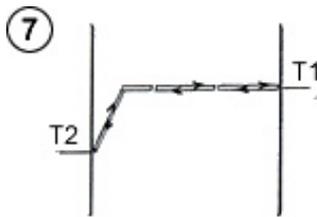


L'échange énergétique décrit plus haut tend à réchauffer la plaque électrostatique et à refroidir la plaque ordinaire, jusqu'à ce que l'écart de température entre les plaques atteigne une valeur correspondant à l'énergie potentielle du champ d'attraction. L'équilibre thermodynamique est atteint lorsque l'énergie moyenne des molécules, au contact de chaque plaque, correspond à la température respective des plaques (schéma ci-contre). Dans

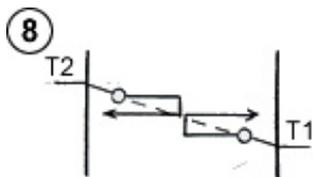
ce cas, il n'y a globalement plus d'accommodation thermique, et donc plus de transfert thermique. Cette situation correspond à la configuration « table de billard », où les boules rebondissent sur les parois en conservant leur énergie cinétique.



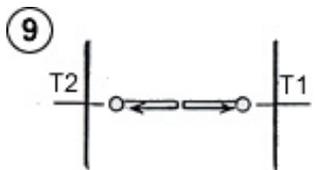
Avec une pression plus forte (ou gaz plus dense), le principe fondamental reste inchangé, si ce n'est que les molécules, une fois sorties du champ d'attraction et refroidies, reprennent de l'énergie par collisions intermoléculaires plutôt que sur la plaque froide. Le processus d'échange énergétique en dehors du champ d'attraction demeure identique à celui entre deux plaques ordinaires, avec une température variant sur l'axe Ox selon un gradient ou une pente thermique ((3) schéma ci contre) qui détermine par ailleurs la puissance de transfert thermique. Ainsi, lorsque la pente thermique dans cette zone est plate, l'équilibre thermodynamique est atteint, et la puissance de transfert s'annule (schéma 7). D'après ce schéma, le gaz régnant dans le champ d'attraction (contre la plaque électrostatique) serait en équilibre thermodynamique malgré la variation de température, et malgré les collisions intermoléculaires dans cette zone. Pour, s'en convaincre, il faut examiner les conditions dans lesquelles l'équilibre s'établit.



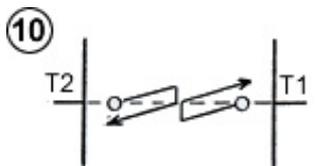
Comme on l'a vu sur les figures 3 et 6, les collisions tendent à égaliser l'énergie moyenne des deux sens de déplacement des molécules. Si l'on considère à un moment donné l'ensemble des molécules se trouvant sur un plan parallèle aux plaques, compris entre 0 et x, les molécules se déplaçant vers la gauche ont une énergie moyenne plus élevée que celles se déplaçant vers la droite, mais cette différence tend à s'annuler pour ce qui concerne les molécules qui viennent d'entrer en collision (schéma ci-contre).



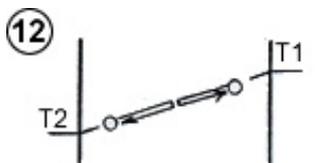
L'équilibre thermodynamique s'établit lorsque les molécules ont une énergie moyenne identique dans les deux sens de déplacement, c'est à dire lorsqu'il n'y a plus d'échange global d'énergie dans les collisions. Dans ce cas, tout le gaz est à température uniforme, l'énergie moyenne des molécules est la même partout (schéma ci-contre).



Si l'on introduit maintenant un champ d'attraction, les molécules se déplacent avec une énergie variable et non plus constante comme dans les cas précédents (ce qui est caractérisé par les flèches en pente). Dans le cas schématisé ci-contre où la température est uniforme dans le gaz, les molécules acquièrent ou perdent de l'énergie pendant leur trajet, et par conséquent elles se rencontrent avec une énergie différente, d'où un échange global d'énergie dans les collisions. Le gaz n'est pas en équilibre thermodynamique



Pour reprendre le modèle de la figure 3, l'échange thermique entre les deux plaques se produirait comme représenté sur le schéma ci-contre.



L'équilibre thermodynamique s'établit lorsque les molécules se déplaçant de chaque côté ont une énergie moyenne identique au moment du choc. Dans ce cas, il n'y a plus d'échange global d'énergie dans les collisions, bien que la température ne soit pas uniforme dans le gaz (schéma ci-contre).



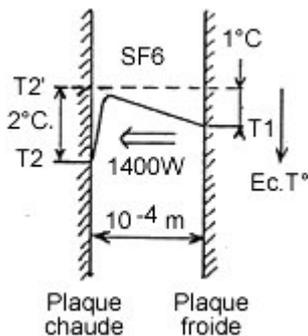
Nous avons un exemple naturel de gaz en équilibre thermodynamique bien que sa température ne soit pas uniforme, c'est l'atmosphère. En effet, la température et la pression baissent lorsque l'on s'élève en altitude, d'environ 6°C pour 1000 mètres. C'est le champ d'attraction de la pesanteur qui est à l'origine de cette variation de température et de pression. Les masses d'air se compressent et se réchauffent en descendant, ou bien se détendent et se refroidissent en montant. Le principe de l'invention consiste en fait à créer un champ de pesanteur très puissant de manière à obtenir une différence de température suffisante sur une très petite distance, et l'on peut considérer que la plaque électrostatique chaude est la plaque basse altitude, tandis que la plaque ordinaire froide est la plaque haute altitude.

Puissance de transfert thermique

Pour calculer la puissance de transfert thermique (courant de chaleur), on reprendra la formule utilisée avec deux plaques ordinaires, moyennant une adaptation pour la température de la plaque électrostatique. En effet, ce n'est pas la température réelle de la plaque électrostatique qu'il faut considérer, mais la température au delà du champ d'attraction (T_2' – voir schéma 6), qui avec T_1 , définit le gradient de température dans l'espace gazeux en dehors du champ d'attraction. T_2' est égal à la température réelle de la plaque (T_2) à laquelle on soustrait la différence de température correspondant à l'énergie potentielle du champ d'attraction.

$$Q = \lambda \frac{T_1 - T_2'}{d + 2g}$$

14



Imaginons le cas de deux plaques séparées de 0.1 mm (10^{-4} m), et un champ d'attraction équivalent à 2°C. (l'exemple est volontairement modeste pour bien montrer la potentialité du procédé). En équilibre thermique, c'est à dire lorsque la pente thermique est plate en dehors du champ d'attraction ($T_1 - T_2' = 0$), la plaque électrostatique serait plus chaude que la plaque ordinaire de 2°C. En réduisant de 1°C cet écart de température, on redresse d'1°C la pente thermique, donc $T_1 - T_2' = 1^\circ\text{C}$.

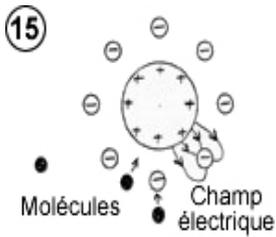
Si le gaz utilisé est de SF6, dont la conductivité thermique est $\lambda = 0,14 \text{ W / m.k}$, et en négligeant $2g$ si g est petit devant d , le courant de chaleur par mètre carré serait :

$$Q = \frac{0,14 \times 1^\circ\text{C}}{10^{-4} \text{ m}} = 1400 \text{ Watts,}$$

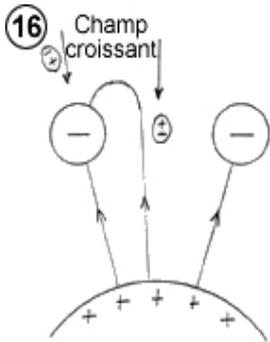
de la plaque froide vers la plaque chaude

Avec des plaques séparées de 0,01 mm (10 microns), ce qui est envisageable, et un champ d'attraction équivalent à 20°C, on aurait 140 KW / m² !

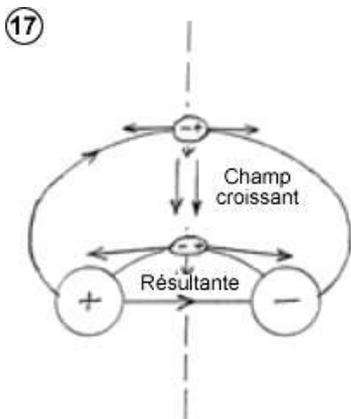
Principe électrostatique



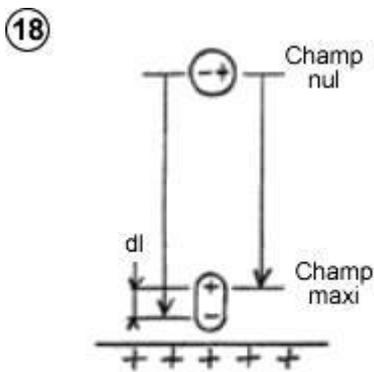
Imaginons une barre métallique chargée positivement à l'intérieur d'une grille métallique cylindrique reliée à la masse, c'est à dire une cage de Faraday. Celle-ci neutralise le champ électrique en dehors de la cage, grâce à la charge négative dont elle se dote par influence. Si une molécule de gaz se trouve loin de la cage, elle ne perçoit pas de champ électrique et il ne se passe rien. Par contre, si elle approche suffisamment de la grille, l'effet d'écran disparaît et la molécule se polarise sous l'effet du champ électrique résidant entre la barre et la grille (schéma ci-contre).



Dans le cas où elle pénètre entre deux barreaux de la grille, les électrons de la molécule sont attirés et son noyau repoussé. Mais comme les électrons sont plus près de la barre, et par conséquent dans un champ plus intense que le noyau, l'attraction des électrons l'emporte sur la répulsion du noyau : La molécule toute entière est attirée (schéma ci-contre). Dans le cas où elle s'approche d'un barreau de la grille, le noyau de la molécule est attiré et les électrons repoussés. Comme le noyau se trouve plus près de la grille et par conséquent dans un champ plus intense que les électrons, l'attraction du noyau l'emporte sur la répulsion des électrons. Là encore la molécule est attirée.



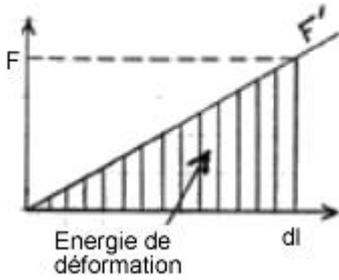
Si on prend encore le cas d'une molécule se déplaçant sur l'axe de symétrie d'un dipôle, c'est à dire perpendiculairement au champ électrique, (schéma 17), le noyau de la molécule est attiré vers la barre chargée négativement, et les électrons vers la barre chargée positivement, chacune de ces forces étant dirigée tangentielllement à la ligne de champ. Comme cette ligne est courbée, les deux forces d'attraction opposées ne sont donc pas parallèles, d'où une résultante de force dirigée vers le champ croissant. La pénétration d'une molécule dans un champ électrique a toujours pour effet de l'attirer vers le champ croissant, sans rapport avec la direction ni le sens du champ. Ce phénomène d'attraction par polarisation électrostatique d'un gaz est connu sous le nom de force de Debye, qui est par exemple à l'origine de la formation d'hydrates de gaz rares ($Ar_n H_2O$), avec production de chaleur résultant de l'énergie d'attraction entre molécules.



Paramètres de l'énergie d'attraction

Lorsqu'une molécule polarisable, telle que SF6, pénètre dans un champ électrique, elle produit un dipôle qui induit une différence, en valeur absolue, d'énergie potentielle électrique acquise par les deux charges positives et négative. Cette différence d'énergie potentielle est le produit du décalage dl entre les charges (schéma ci-contre) par la force électrostatique F qui les sépare à cet endroit. Cependant une partie de cette énergie sert à déformer la molécule, de même qu'il faut de l'énergie pour actionner un ressort. Comme la force de déformation F' varie linéairement avec dl (voir schéma 19) la force moyenne de déformation est donc $\frac{1}{2} F$, et l'énergie de déformation $\frac{1}{2} F \cdot dl$.

19



Par conséquent, l'énergie restante de $\frac{1}{2} F \cdot dl$ est l'énergie d'attraction de la molécule sur la plaque.

La polarisabilité de la molécule est $\infty = Q \cdot dl / E$ (en $\text{Cm} / \text{Vm}^{-1}$) donc $Q \cdot dl = \infty \cdot E$ d'autre part la force électrostatique qui sépare les charges

$$F = Q \cdot E$$

$$\text{donc } F \cdot dl = Q \cdot E \cdot dl = \infty \cdot E^2$$

$$\text{Energie d'attraction} = \frac{1}{2} F \cdot dl = \frac{1}{2} \infty \cdot E^2$$

On retrouve cette formule par différents auteurs.

Autrement dit l'énergie d'attraction d'une molécule polarisable ne dépend que de la valeur du champ électrique en surface de la plaque, indépendamment de la longueur L d'attraction, c'est à dire l'épaisseur de la zone de champ variable à traverser, et indépendamment aussi de la valeur du gradient du champ électrique. En effet, pour un même champ électrique en surface, si l'on double l'épaisseur de la zone du champ variable, on double la longueur L d'attraction, mais en même temps on réduit de moitié le gradient du champ électrique et donc la force d'attraction. Par conséquent le travail d'attraction reste identique.

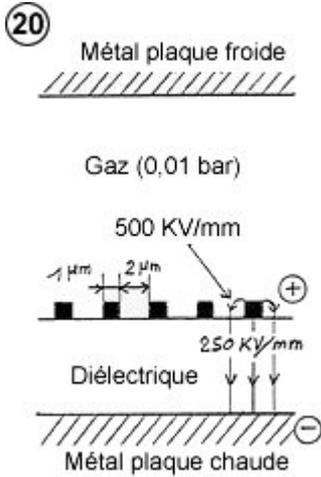
Le tableau ci-dessous donne l'énergie d'attraction (ou travail d'attraction) et la correspondance en degrés d'échauffement, pour quelques exemples de molécules de gaz pénétrant dans un champ de $5 \times 10^8 \text{ V/m}$ (500 KV/mm)

En supposant qu'elles proviennent d'une zone où le champ est nul. L'échauffement d'un 1°C équivaut à environ 2×10^{-23} Joules par molécule de gaz monoatomique, c'est à dire $3/2 K$, avec $K = 1,38 \times 10^{-23}$ Joule.

Pour une molécule polyatomique telle que SF6, l'énergie de translation de la molécule ne représente plus qu'environ la moitié de son énergie totale, l'autre moitié étant de l'énergie de rotation sur elle même. Pour estimer assez correctement l'échauffement d'une telle molécule, étant donné que seule l'énergie de translation est augmentée lorsque la molécule pénètre dans le champ électrique, il faudrait diviser par deux l'échauffement que l'on aurait s'il s'agissait d'une molécule monoatomique (qui ne possède que de l'énergie de translation).

gaz	Polarisabilité (en $\text{Cm} / \text{Vm}^{-1}$)	Energie d'attraction avec $5 \times 10^8 \text{ V/m}$	Degrés d'échauffement
Argon	$1,85 \times 10^{-40}$	2×10^{-23} Joules	1 Kelvin
Krypton	$2,95 \times 10^{-40}$	$3,2 \times 10^{-23}$ Joules	1,6 K
Xenon	$4,66 \times 10^{-40}$	5×10^{-23} Joules	2,5 K
SF6	$7,4 \times 10^{-40}$	8×10^{-23} Joules	4/2 K

Description technique de la plaque électrostatique. Modèle de référence.



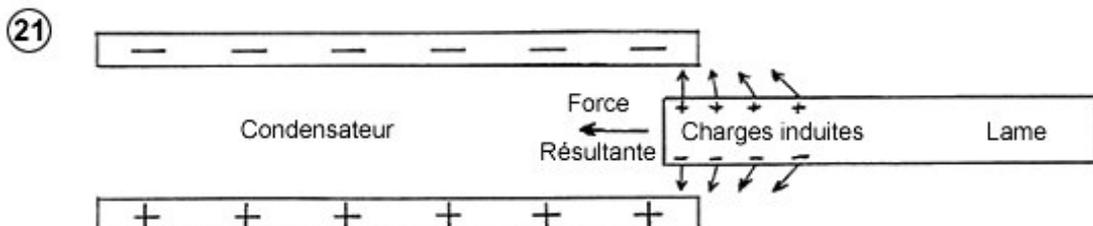
Il s'agit d'un condensateur dont l'armature chargée négativement est constituée par la plaque métallique, sur laquelle est déposée un diélectrique mince, et la grille, en contact avec le gaz, qui constitue l'armature chargée positivement. Cette grille pourrait se réaliser en gravant des trous dans une couche de métal déposée sous vide sur l'isolant. La grille joue le rôle de cage de Faraday décrite plus haut dans « principe électrostatique ». Elle permet de générer un champ intense à la surface de la plaque, plus précisément dans les trous de la grille, et un champ résiduel négligeable dans tout l'espace gazeux restant.

Pourquoi n'applique t'on pas le champ électrique dans tout l'espace gazeux ?

Ca éviterait la grille. Mais, c'est le gradient du champ électrique, c'est à dire la variation de son intensité dans l'espace, qui provoque l'attraction des molécules de gaz. C'est entre la région où le champ est négligeable et la région où le champ est intense (dans les trous de la grille) qu'elles sont attirées. Dans une telle zone de champ variable, les charges électriques positives et négatives du dipôle moléculaire ne subissent pas exactement la même force électrostatique (attraction ou répulsion) puisqu'elles ne sont pas situées au même endroit, et c'est cette différence de force entre l'attraction d'une charge et la répulsion de la charge opposée qui induit une résultante de force qui est à proprement parler la force d'attraction de la molécule. Celle-ci s'exerce toujours en direction du gradient de champ, c'est à dire vers le champ intense, et non pas selon la direction du champ électrique.

Si l'on plaçait un gaz dans un champ électrique uniforme, entre une cathode et une anode, les molécules de gaz ne subirait aucune force d'attraction. Chacune des molécules fournirait malgré tout un dipôle en raison du champ électrique qui sépare les charges opposées, mais le champ électrique étant uniforme la force de répulsion d'une charge compenserait exactement la force d'attraction de la charge opposée.

Voici une expérience très éclairante sur ce phénomène. Si l'on introduit une lame diélectrique dans un condensateur chargé, la lame est attirée dans le condensateur. L'énergie d'attraction provient de la polarisation de la lame, c'est à dire des charges induites sur chaque surface de la lame en pénétrant dans le condensateur. Ces charges exercent une attraction par rapport aux bornes positive et négative du condensateur, telle qu'indiqué sur le schéma. La force d'attraction de la lame dans le condensateur est une résultante de l'ensemble de ces forces, et elle persiste tant que la lame n'est pas complètement introduite dans le condensateur. Dès qu'elle est complètement introduite, la force d'attraction disparaît.



Le principe est le même pour une particule unique. Une telle particule serait attirée en pénétrant dans le condensateur, mais plus après. La force d'attraction est palpable dans le cas de la lame à cause du nombre très élevé de molécules qu'elle contient.

Dimensions de la grille

Pour éviter tout phénomène de claquage du gaz dans la zone de champ intense, c'est à dire dans les trous de la grille, on doit réduire au maximum la dimension de ces trous, ainsi que l'épaisseur de la grille. De même, on ne peut réduire l'épaisseur du diélectrique qu'en proportion des trous de la grille.

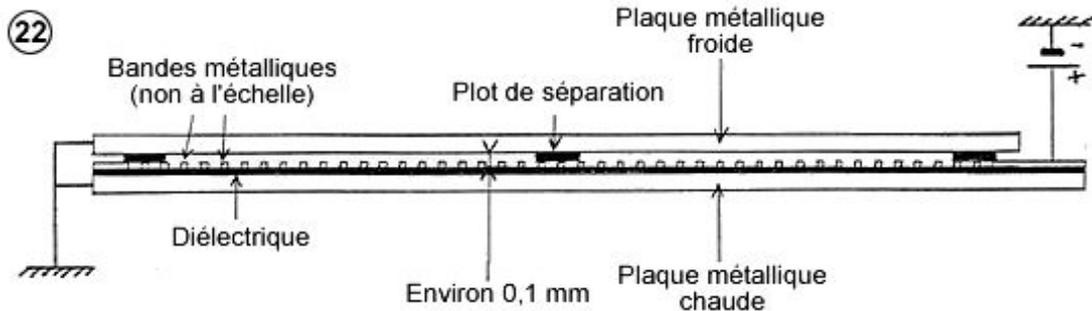
Or, plus le diélectrique est mince, plus sa rigidité diélectrique est élevée. La rigidité diélectrique d'une couche de Parylène de 5 microns serait satisfaisante pour appliquer le champ électrique voulu (250 KV / mm). Mais, on peut considérer que ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Pression du gaz

On doit faire en sorte que le libre parcours moyen d'un électron dans le gaz (sans ionisation) corresponde à peu près à la distance entre les plaques de manière à éviter la multiplication des électrons pouvant être émis par la surface diélectrique, capable de produire un claquage dans le gaz. Dans le cas d'une distance entre les plaques de 0,1 mm, il faudrait faire un vide minimum d'environ 0,01 bar.

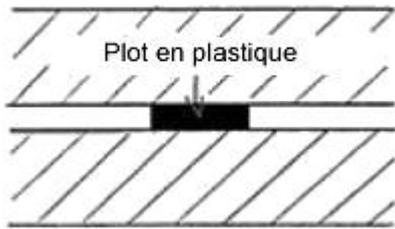
Valeur du champ électrique et potentiel

La valeur moyenne du champ électrique en surface va déterminer l'énergie d'attraction des molécules et l'échauffement de la plaque. Ce champ est le plus intense dans les trous de la grille, sur la surface diélectrique, beaucoup moins sur la surface horizontale métallique de la grille. D'après des calculs effectués par ordinateur, la valeur moyenne du champ électrique en surface serait en gros, avec une diélectrique plastique dont la permittivité relative $\epsilon_r = 2$, le double du champ électrique existant dans le diélectrique. Un champ de 250 KV / mm dans le diélectrique est donc nécessaire si l'on veut obtenir un champ moyen de 500 KV / mm en surface. Avec une épaisseur diélectrique de 5 microns, le potentiel électrique s'élèverait donc à 1,25 KV. Pour un même champ électrique, le potentiel nécessaire est d'autant plus bas que le diélectrique est mince.



Plots de séparation

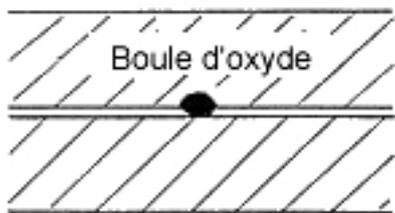
23



Répartis sur toute la surface des plaques, ils maintiennent un espacement régulier entre celles-ci. Ils sont aussi peu nombreux et aussi étroits que possible de manière à limiter le retour de chaleur dans le sens normal plaque chaude => plaque froide.

- ✓ Une manière de les réaliser pourrait consister à déposer, sur la face inférieure de chaque plaque (à l'opposé de la face gravée), une couche plastique adhérente d'épaisseur égale à la distance de séparation voulue, puis à enlever cette couche par fraisage, en dehors de ce que l'on veut garder pour les plots.

24



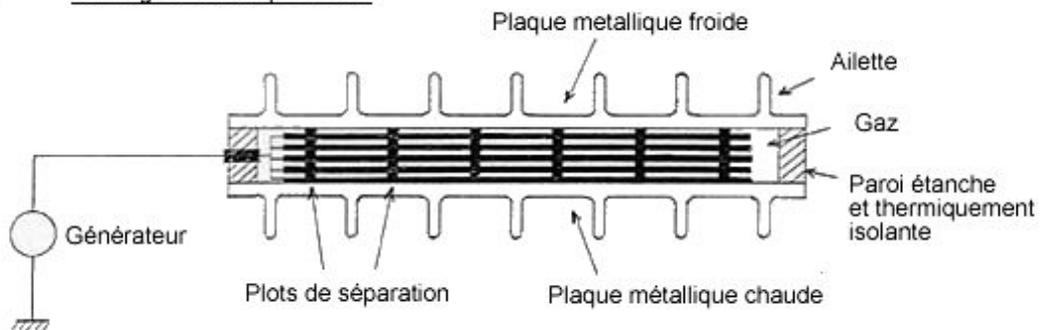
- ✓ Une autre possibilité permettant de réduire la distance de séparation, et par suite d'augmenter la puissance de transfert thermique, consisterait à former des microboules d'oxyde à la surface du métal, par exemple par implantation ionique.

Configuration d'ensemble

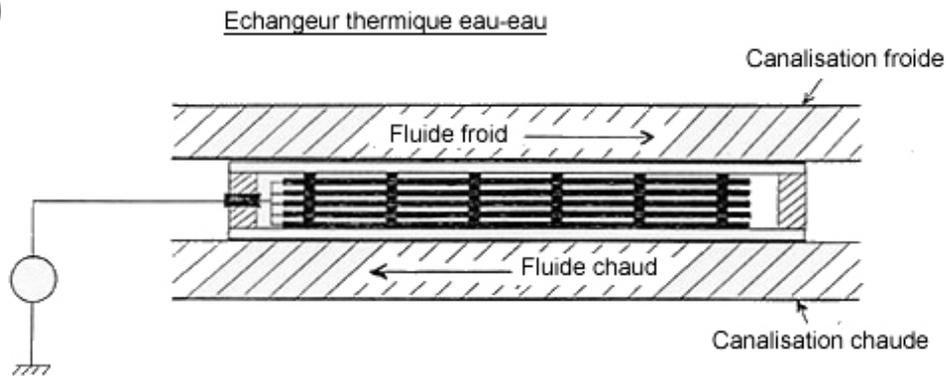
L'échauffement de quelques degrés d'une plaque par rapport à celle qui lui fait face doit être multiplié pour obtenir un écart de température suffisant entre la source froide et la source chaude. La solution consiste à procéder par étages, c'est à dire à superposer les plaques en mille-feuille, la plaque froide d'un étage devenant la plaque chaude de l'étage suivant. Si l'on reprend l'exemple décrit dans le schéma 14, on retrouverait la puissance de transfert thermique de 1400 Watts que l'on avait entre deux plaques, mais cette fois entre la source froide et la source chaude, avec la différence de température voulue.

25

Echangeur thermique Air-Air



26



Puissance électrique consommée

Il s'agit de la puissance consommée par le générateur pour maintenir la tension dans les condensateurs, car un courant (très faible) traverse le diélectrique et déchargerait les condensateurs s'ils n'étaient maintenus à tension constante. Le courant est fonction de la résistivité du diélectrique. Avec un matériau très résistif tel que du Parylène ($10^{17} \Omega\text{cm}$ au champ voulu), on a, avec un champ électrique de 10^7 V/cm , un courant de $10^{-10} \text{ A / cm}^2$ ou 10^{-6} A / m^2 . Avec une tension d'environ 1000 Volts on obtient une puissance consommée d'environ $10^{-3} \text{ Watt / m}^2$, soit 0,01 Watt pour un mille-feuille de 10 plaques d'1 m^2 , ce qui est négligeable au regard de la puissance de transfert thermique calculée plus haut (voir schéma 14).

Autres configurations de la plaque

Elles restent basées sur le même principe, c'est à dire la création, à la surface d'une plaque, d'un champ électrique permettant d'attirer les molécules de gaz pour leur faire céder de l'énergie par accommodation thermique.

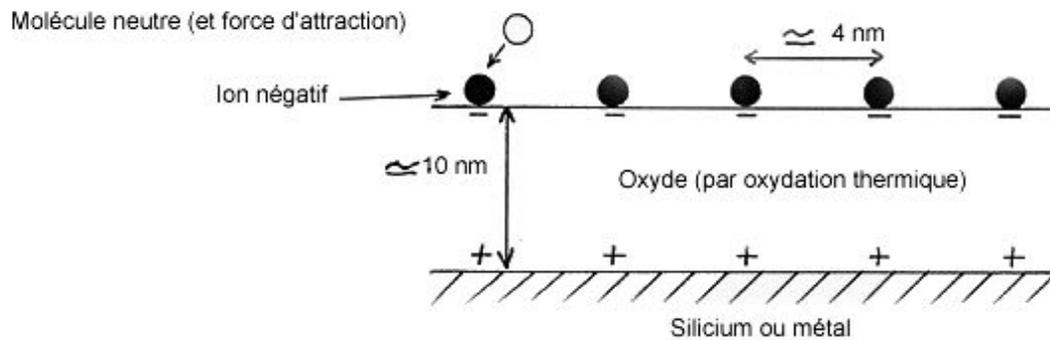
1) Ions en surface

Des ions répartis uniformément en surface remplacent la grille métallique de la première configuration. Les molécules de gaz seraient attirées par le champ électrique intense à proximité d'un ion. La répartition des ions s'effectuerait automatiquement par répulsion des ions entre eux. Les ions pourraient être produits par émission électronique d'une cathode froide (cathode qui émet des électrons avec un champ électrique faible) dans un gaz électronégatif (molécule qui capte facilement un électron supplémentaire) tel du SF₆.

Avantages

- Obtention d'un champ élevé à proximité d'un ion ($1,5 \times 10^9 \text{ V / m}$ à 1 nm)
- La minceur du diélectrique (10 nm) et la charge statique des ions négatifs n'autorisent plus un claquage du diélectrique
- On évite les problèmes liés à la grille métallique :
 - Champ trop élevé près des arêtes métalliques risquant d'ioniser les molécules de gaz neutre.
 - Risque d'émission d'ions à partir du métal de la grille, qui viendraient « polluer » la surface diélectrique en dispersant la charge positive concentrée à l'origine sur la grille, ce qui affaiblirait progressivement le champ électrique dans les trous de la grille.

27



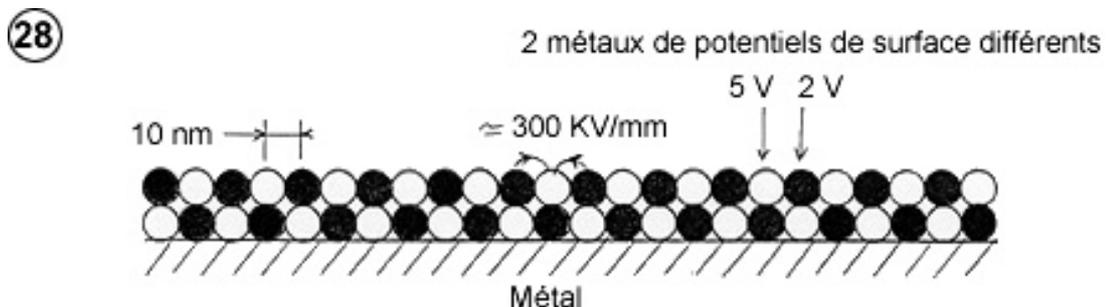
2) **Mélange de deux types de particules très fines de potentiels de surface différents**

Il s'agirait de déposer sur un substrat métallique un mélange de deux poudres hyper fines, de potentiels de surface différents, de manière à créer un champ électrique entre deux grains voisins de natures différentes. S'il est possible d'obtenir des grains assez fins (environ 10 nm), de les mélanger et de les faire adhérer correctement, on peut alors obtenir, par exemple avec deux métaux, un de faible potentiel et l'autre de fort potentiel, un champ de 3 V / 10 nm soit 300 KV / mm.

Avantages

Il n'y a plus de potentiel à entretenir dans un condensateur, plus d'ions à produire, donc plus de travail à fournir et plus besoin de générateur.

Si une molécule de gaz s'ionise accidentellement près de la surface (radiation ionisante) l'électron libre se dirige vers un grain de potentiel faible, et l'ion vers un grain de fort potentiel. On pourrait alors conclure qu'il y aura progressivement une dispersion de la charge et une diminution du champ électrique. Cependant le potentiel d'ionisation de la molécule de gaz étant plus fort que le potentiel de surface du grain, la molécule ionisée doit récupérer automatiquement son électron perdu, puis l'électron gagné par le grain de faible potentiel doit revenir vers le grain de fort potentiel par conductivité électrique.

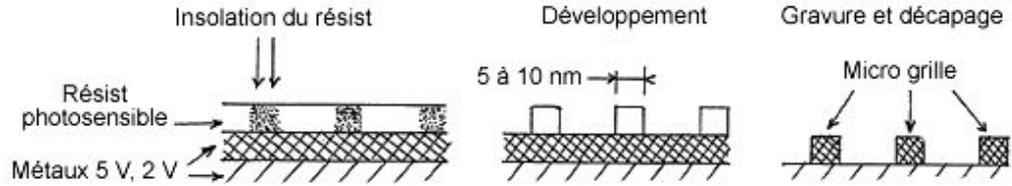


Un tel système où il n'y a plus de travail à fournir peut faire penser à un mouvement perpétuel. Quoique l'on puisse penser, les molécules sont effectivement en mouvement perpétuel dans un gaz. S'il est possible de produire un champ d'attraction sans fournir de travail, comme c'est le cas par exemple du champ de pesanteur terrestre, un tel procédé ne ferait finalement rien de plus que ce que la nature fait déjà depuis très longtemps.

3) **Grille ultra-fine sur un substrat de potentiel de surface différent, réalisée par lithographie électronique**

Cette variante consisterait à insoler directement un resist photosensible par faisceau électronique, ce qui permettrait d'obtenir des trous suffisamment petits pour obtenir un champ électrique assez élevé entre le substrat et la grille, selon le procédé ci-dessous.

29



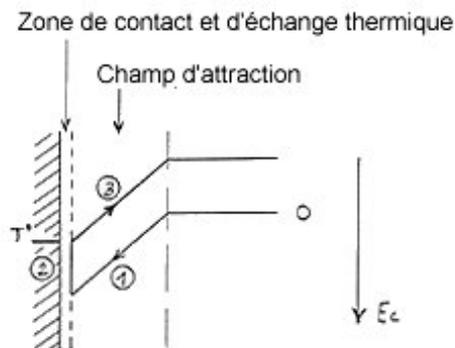
4) Surface microporeuse

Il s'agirait d'utiliser le champ électrique existant naturellement à la surface de tous les matériaux, qui est à l'origine de l'adsorption (chimisorption ou physisorption). On discerne cependant deux obstacles à cette utilisation.

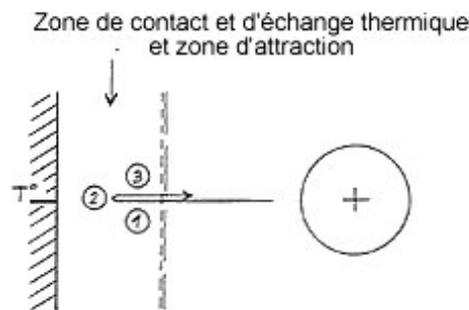
- ✓ Si l'énergie d'adsorption est forte, les molécules gazeuses sont piégées, c'est à dire qu'elles ont un temps de séjour trop long et elles encombrant l'espace où les molécules libres pourraient être attirées à leur tour.
- ✓ Avec une surface lisse, la zone d'attraction est vraisemblablement confondue avec la zone de contact et d'échange thermique, de telle sorte que la molécule gazeuse ne pourrait pas être accélérée avant de céder de l'énergie sous forme thermique, et ne serait donc pas ralentie non plus en repartant. Les deux fonctions d'attraction et d'échange thermique seraient simultanées, ce qui permettrait à la molécule de repartir en reprenant l'énergie qu'elle a cédée sur la plaque en arrivant. Le bilan d'échange énergétique serait donc nul (voir schéma).

30

Phénomène escompté dans l'invention



Phénomène intervenant vraisemblablement dans l'absorption d'une surface lisse



(1) la molécule accélère en tombant dans le champ d'attraction

(2) elle cède l'énergie en trop par accommodation thermique

(3) elle ralentit en remontant le champ d'attraction

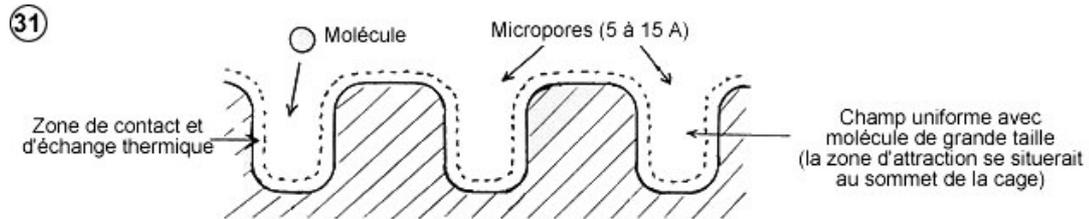
(1) la molécule subit une attraction mais libère simultanément cette énergie sur la paroi sous forme de chaleur

(2) elle s'immobilise selon un temps plus ou moins long, selon l'énergie d'attraction : 10^{-13} s pour 0,1 Kcal / mole, jusqu'à 10^9 s pour 30 Kcal.

(3) elle repart en reprenant la chaleur d'interaction (la simultanéité doit jouer dans les deux sens)

Le bilan des échanges énergétiques est nul.

Ce problème de simultanéité des fonctions d'attraction et d'échange thermique disparaîtrait si l'on pouvait dilater la zone d'attraction pour la faire déborder de la zone d'échange thermique, et c'est apparemment le cas dans un micropore. On sait qu'une molécule de vapeur subit une forte énergie d'attraction en pénétrant dans un micropore (en fonction de la taille du micropore, de la molécule et de sa polarisabilité), mais la molécule reste libre à l'intérieur et rebondit comme sur une paroi normale, ce qui laisse supposer que la zone d'échange thermique est recouverte par la zone d'attraction, comme représenté ci-dessous.



On peut créer une telle surface microporeuse avec des Zéolites synthétiques, des charbons actifs, des gels de silice, des verres poreux. On réduira l'inconvénient d'un séjour trop long dans les micropores en réduisant l'énergie d'attraction de la molécule par utilisation d'une molécule non polaire et de grande taille. Toujours dans le but de limiter l'encombrement des pores on réduira la densité du gaz jusqu'à 0,001 bar.

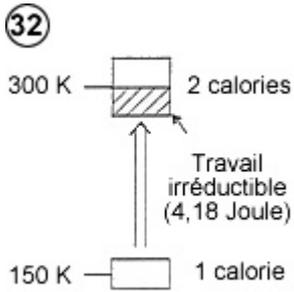
Avantages de l'invention par rapport aux pompes actuelles

Les avantages obtenus, grâce à cette invention, sont ceux des pompes thermoélectriques : compacité, simplicité, pas d'organe en mouvement et donc pas de bruit, mais avec en plus un très bon coefficient de performance, en mesure de réaliser des économies d'énergie et de réduire la pollution [coefficient de performance ou COP = rapport de la quantité d'énergie rejetée à la source chaude (en calories) sur le travail fourni à la pompe (en Joules – 1 calorie = 4,18 Joules)]. Voir aussi, dans les applications, les possibilités nouvelles induites par ce coefficient de performance.

Pourquoi le coefficient de performance du procédé (COP) peut-il dépasser celui de Carnot. Comparaison des cycles thermodynamiques.

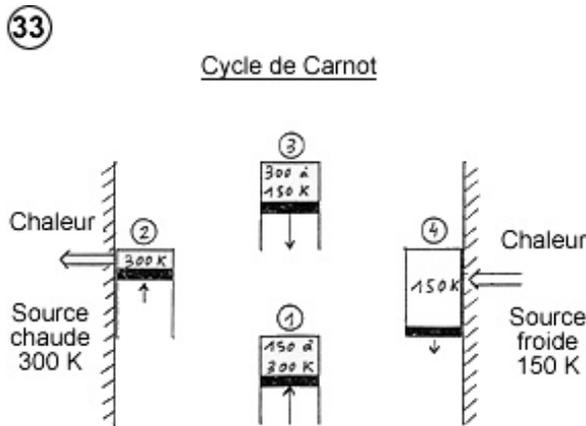
Théorème de Carnot :

$$\frac{Q_2 \text{ (chaleur rejetée à la source chaude)}}{Q_1 \text{ (chaleur prélevée à la source froide)}} = \frac{T \text{ (température source chaude)}}{T_1 \text{ (température source froide)}}$$



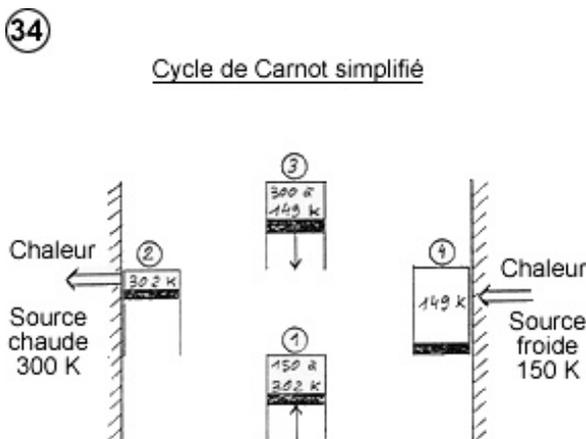
D'après le théorème de Carnot, si l'on dispose d'une source froide à 150 Kelvins et d'une source chaude à 300 K ($T_{\text{source chaude}} / T_{\text{source froide}} = 2$) le prélèvement d'une calorie à la source froide induit le rejet minimum de 2 calories à la source chaude, la seconde calorie provenant du travail minimum fourni à la pompe (4,18 Joules). Dans ce cas, le COP de Carnot = 2. Pour mettre en lumière la cause du travail irréductible à fournir dans tous les procédés actuels, il convient d'observer en détail le cycle de Carnot, qui constitue une méthode parfaite du point de vue de l'économie du travail à fournir dans une pompe à chaleur à compression mécanique.

Considérons 1 mole de gaz parfait à 150 K



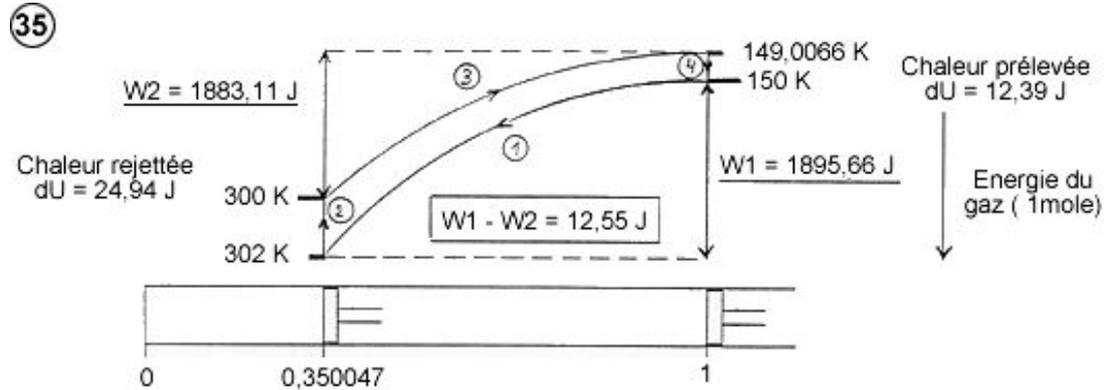
- (1) On comprime le gaz adiabatiquement pour le réchauffer jusqu'à la température de la source chaude.
- (2) Après l'avoir mis en contact avec la source chaude, on le comprime encore de manière isotherme pour écouler de la chaleur dans celle-ci. Cette opération doit se faire très lentement pour ne pas chauffer le gaz par rapport à la source chaude.
- (3) On le détend adiabatiquement pour le refroidir jusqu'à la température de la source froide.
- (4) Après l'avoir mis en contact avec la source froide, on le détend encore de manière isotherme (très lentement) pour puiser de la chaleur dans celle-ci.

On s'aperçoit que l'on obtient, à très peu de chose près, le même résultat en supprimant la compression et la détente isotherme et en les remplaçant par une petite différence de température entre le gaz et la source chaude ou froide au moment de leur mise en contact. Cette méthode nous rapproche nettement du cycle thermodynamique de l'invention, et va montrer clairement la différence et l'originalité de l'invention.



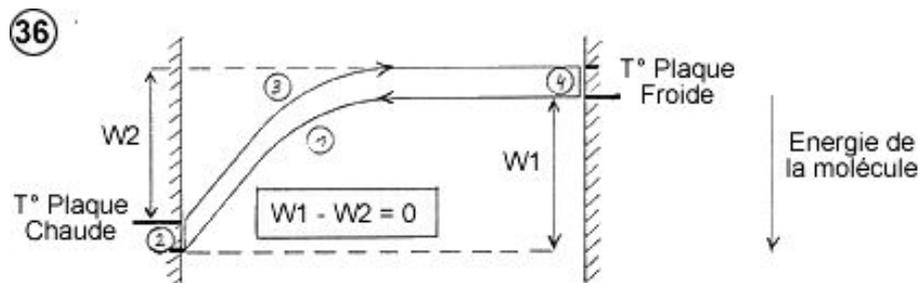
- (1) Compression adiabatique du gaz (1 mole) et réchauffement de 150 à 302 K (302 K est choisi arbitrairement)
 $W_1 = 1895,66$ Joules avec $W = \frac{3}{2} R (T_2 - T_1)$
- (2) Refroidissement du gaz au contact de la source chaude, de 302 à 300 K
 chaleur dégagée $dU = 24,94$ J avec $U = \frac{3}{2} RT$
- (3) Détente adiabatique du gaz et refroidissement de 300 à 149,0066 K
 $W_2 = 1883,11$ Joules
 Cette fois la température de 149,0066 K est déterminée par le rapport des volumes V_1 / V_2 , identique dans la compression et la détente avec $T_2 = (V_1 / V_2)^{2/3} \times T_1$ et $V_2 = V_1 / (T_2 / T_1)^{3/2}$.
- (4) Réchauffement du gaz au contact de la source froide, de 149,0066 K à 150 K
 Chaleur emmagasinée = 12,39 Joules.

On peut résumer la situation par le cycle énergétique du gaz représenté ci-dessous : si l'on prélève 12,39 Joules à la source froide, on rejette 24,94 Joules à la source chaude, soit une différence de 12,55 J , qui correspond exactement au travail globalement dépensé dans le cycle ($W_1 - W_2$). Comme prévu, une calorie prélevée à la source froide induit le rejet de deux calories à la source chaude ($24,94 / 12,39 = 2,013$), la seconde calorie provenant du travail fourni.



On voit que l'énergie du gaz, c'est à dire sa température, est en moyenne plus élevée dans la compression que dans la détente, pour la simple raison qu'il est réchauffé juste avant la phase de compression et refroidi juste avant la phase de détente. Or, si le gaz est plus chaud dans la compression, sa pression est aussi plus élevée. Par conséquent, le travail de compression W_1 est forcément plus important que le travail de détente W_2 , d'où un travail global irréductible à fournir (12,55 J en l'occurrence).

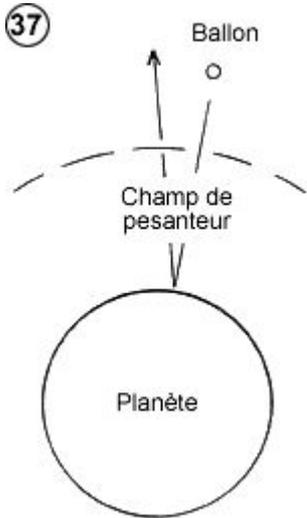
Cycle de la pompe électrostatique



- (1) Accélération ou réchauffement de la molécule de gaz dans le champ d'attraction.
- (2) Refroidissement par accommodation thermique
- (3) Ralentissement ou refroidissement de la molécule dans le champ d'attraction
- (4) Réchauffement par accommodation thermique.

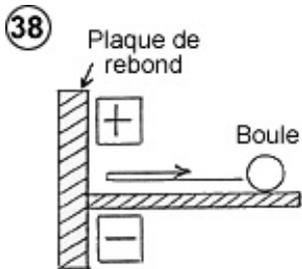
Le travail du piston dans le cycle de Carnot est remplacé ici par le travail du champ d'attraction, et la mise en contact du gaz avec la source chaude ou froide dans le cycle de Carnot s'effectue ici par accommodation thermique. Mais, alors que dans le cycle de Carnot, le travail de compression nécessaire pour réchauffer le gaz (W_1) était supérieur au travail de détente (W_2) qui le refroidissait, cette fois-ci le champ

d'attraction accélère puis ralentit la molécule selon la même énergie potentielle $W_1 - W_2 = 0$.

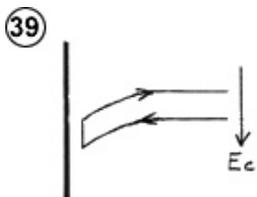


Pour mettre cet aspect en lumière, on pourrait comparer la molécule qui tombe sur la plaque à un ballon dans l'espace qui tombe sur une planète (il faut supposer qu'il n'y a pas d'atmosphère et que le ballon possède une vitesse initiale élevée). En pénétrant dans le champ de pesanteur de la planète, le ballon est accéléré. Par l'effet du choc, il cède de l'énergie sous forme de chaleur, et donc rebondit à une vitesse inférieure. En remontant, il ralentit, et retourne dans l'espace avec une énergie cinétique inférieure à celle qu'il avait avant de tomber sur la planète. Sa courbe énergétique correspondrait exactement à celle décrite dans la partie gauche du schéma ci-dessus.

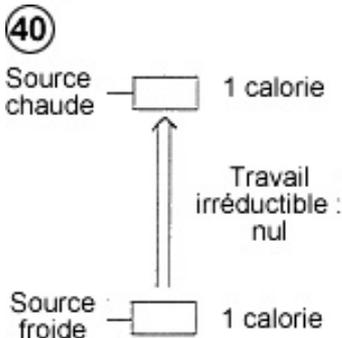
Une fois sorti du champ de pesanteur, le ballon n'a aucune dette énergétique vis à vis du champ de pesanteur. Celui-ci accélère le ballon en tombant, mais il le freine tout autant en remontant. Le principe de conservation d'énergie est respecté. L'énergie libérée dans le choc est payée par un ralentissement final du ballon, mais absolument pas par le champ de pesanteur. Il en va de même pour une molécule dans le champ d'attraction électrostatique.



On peut s'en persuader en observant l'expérience de la lame que l'on introduit dans le condensateur. Pour avoir une image plus rapprochée, on peut remplacer la lame par une boule que l'on ferait rouler sur un plan horizontal, comme représenté sur le schéma ci-contre. En pénétrant dans le champ électrique du condensateur, la boule accélère, son énergie cinétique augmente d'une valeur correspondant à l'énergie d'attraction de la boule, elle frappe la plaque de rebond en cédant de l'énergie, repart donc à une vitesse inférieure, puis elle ralentit en sortant du champ électrique du condensateur. Dans cette opération, si le condensateur est maintenu à charge constante (et non pas à potentiel constant), il n'y a aucune dépense d'énergie électrique avec une isolation électrique parfaite. C'est exactement pareil avec les molécules dans le procédé.



Il n'en allait pas de même dans le cycle de Carnot où la fourniture de travail consacrée à l'accélération des molécules dans la compression ne pouvait en aucun cas être totalement récupérée par leur décélération dans la détente, la chaleur libérée à la source chaude était payée en partie par le travail du piston.



En conclusion, il n'y a plus nécessairement un travail à fournir qui serait transformé en chaleur et rejeté à la source chaude. Dans le cas où le travail est nul, chaque calorie prélevée à la source froide est rejetée à la source chaude, sans plus. Nous verrons, dans les applications, les conséquences induites par cette propriété nouvelle.

Applications traditionnelles des pompes à chaleur mais dont l'intérêt serait accru par un COP élevé.

- Chauffage et climatisation des logements collectifs et individuels, des hôpitaux, hôtels, écoles, salles de spectacle et bureaux.
- Chauffe-eaux, chauffage des piscines, de vendanges, de serres, du sol pour la culture de champignons, de l'eau pour la pisciculture.
- Réfrigérateurs (schéma ci-dessous).
- Machines frigorifiques pour la conserverie et les industries agroalimentaires, pour la climatisation des hangars portuaires.

Systèmes recyclant la chaleur (sans apport extérieur de chaleur à la source froide)

- Séchage de peaux, salaisons, bois, papier, céréales (maïs, orge).
- Evaporation pour la concentration de solutions aqueuses dans l'industrie agroalimentaire, la papeterie et l'industrie chimique.
- Dessalage d'eau de mer.

Sous réserve que le procédé soit capable de fournir une source chaude jusqu'à 120°

On peut noter un marché potentiel dans :

- Le raffinage de pétrole
- La fabrication du papier
- L'industrie agroalimentaire
- La distillerie des alcools

Autres applications liées à la compacité, la simplicité et l'absence de bruit

- Petits réfrigérateurs portatifs
- Containers climatisés
- Radiateur climatiseur pour logement individuel (schéma ci-dessous)

Exemple d'un échangeur thermique air-air à ailettes, pour chauffage et climatisation et d'un réfrigérateur.

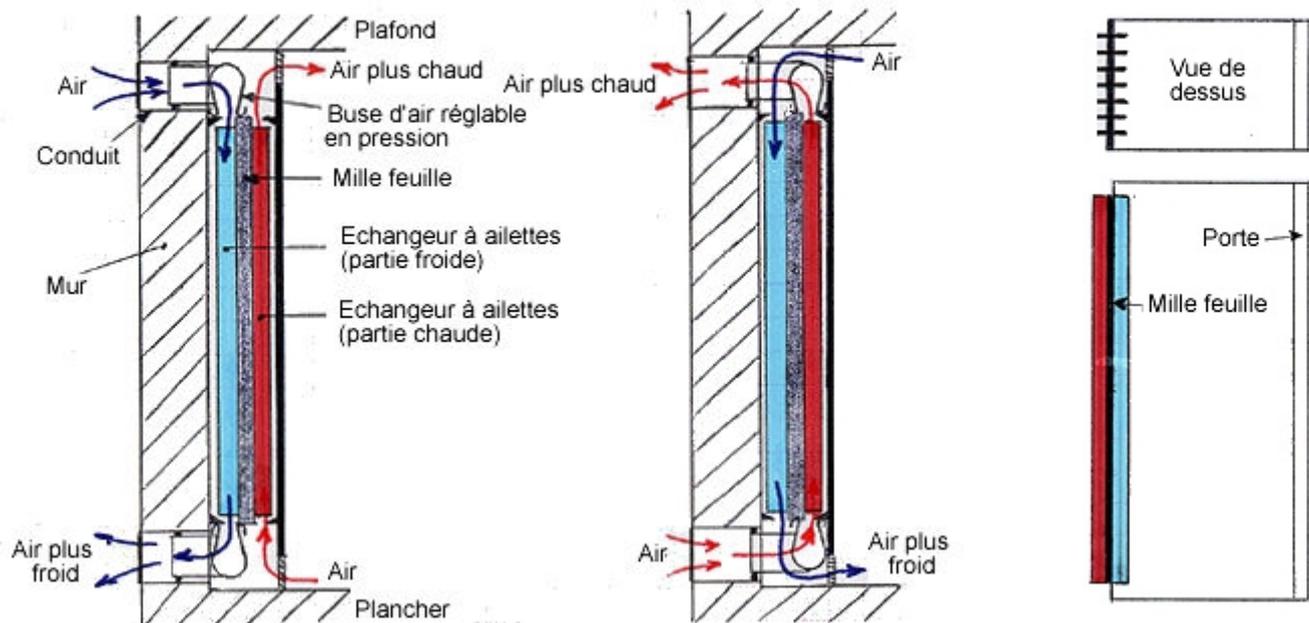
41

Echangeur position chauffage

Echangeur position climatisation

42

Réfrigérateur



Applications spécifiques à l'invention

1) Centrale de conversion de la chaleur ambiante en travail (convertisseur thermoélectrique à source thermique unique)

Le principe consiste à associer une pompe à chaleur à un moteur thermodynamique dans le but de lui faire produire plus de travail que la pompe n'en consomme. La chaleur ambiante puisée dans l'environnement (nappe phréatique, rivière, fleuve, lac, mer, atmosphère...) fournit l'énergie nécessaire à la production du travail utile. Le moteur thermodynamique fonctionne en écoulant de la chaleur de la source chaude vers la source froide (tuyauterie chaude et tuyauterie froide), tout en convertissant une partie de cette chaleur en travail, alors que la pompe à chaleur « remonte » la chaleur de la source froide à la source chaude.

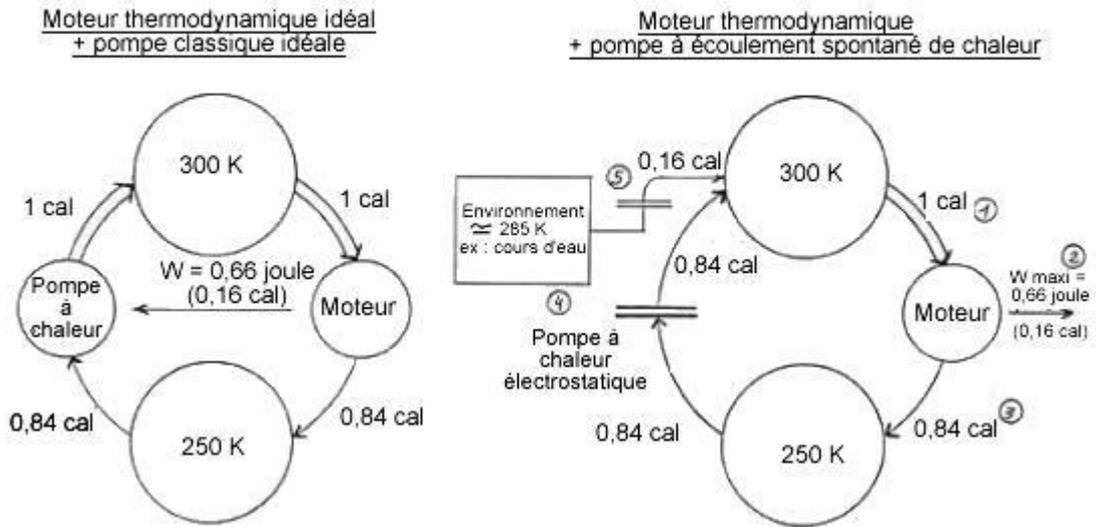
Un tel système ne peut fonctionner qu'avec une pompe à chaleur dont le COP est supérieur au COP de Carnot. En effet, tant que les pompes à chaleur étaient limitées par le COP de Carnot, le couplage d'une telle pompe avec un moteur thermodynamique ne pouvait au mieux qu'aboutir à la neutralisation réciproque de leurs effets, la totalité du travail fourni par le moteur étant consommée par la pompe (voir schéma ci-dessous à gauche).

Par contre, on obtiendrait bien l'effet recherché si le COP de la pompe devenait supérieur au COP de Carnot. Dans le cas où il n'y a plus du tout de travail à fournir à la pompe, tout le travail produit par le moteur peut-être libéré. Ce travail résulterait de la conversion de la chaleur ambiante puisée dans l'environnement (schéma ci-dessous à droite).

Cycle thermodynamique (les températures sont choisies arbitrairement)

- (1) Soit une calorie prélevée à la source chaude par l'évaporateur du moteur.
- (2) Le moteur convertit une partie de cette calorie en travail (0,16 calorie maximum).
- (3) Le reste (0,84 calorie minimum) est déversé par le condenseur à la source froide.
- (4) Pour maintenir la température de la source froide, la pompe à chaleur doit remonter cette quantité de chaleur à la source chaude. Si le travail à fournir à la pompe est nul, cette quantité de chaleur est transférée à la source chaude, sans plus.
- (5) Au bout du compte, la source chaude est refroidie de 0,16 calorie, c'est à dire la quantité de chaleur convertie en travail. On peut la réchauffer en prélevant de la chaleur dans l'environnement, au moyen d'une pompe à chaleur auxiliaire puisque l'environnement est généralement plus froid que la source chaude dans le cas décrit.

43



Principe de fonctionnement (la centrale étant démarrée) (voir schéma 44)

(1) Le fluide de travail, généralement de l'ammoniac, arrive dans l'évaporateur où il prélève de la chaleur à la source chaude. Le fluide chaud (en rouge) subit donc un refroidissement de quelques degrés (les plaques chaudes de la pompe à chaleur pourraient jouer directement le rôle d'évaporateur. De même, les plaques froides pourraient jouer le rôle de condenseur).

(2) La vapeur d'ammoniac arrive dans la turbine où elle se détend en produisant un travail, dont la valeur dépend de l'écart de température entre la source chaude et la source froide.

(3) La vapeur pénètre dans le condenseur où elle cède de la chaleur à la source froide. Le fluide froid (en bleu) subit donc un réchauffement. L'ammoniac devenue liquide est pompée et remise sous pression, puis reprend un nouveau cycle.

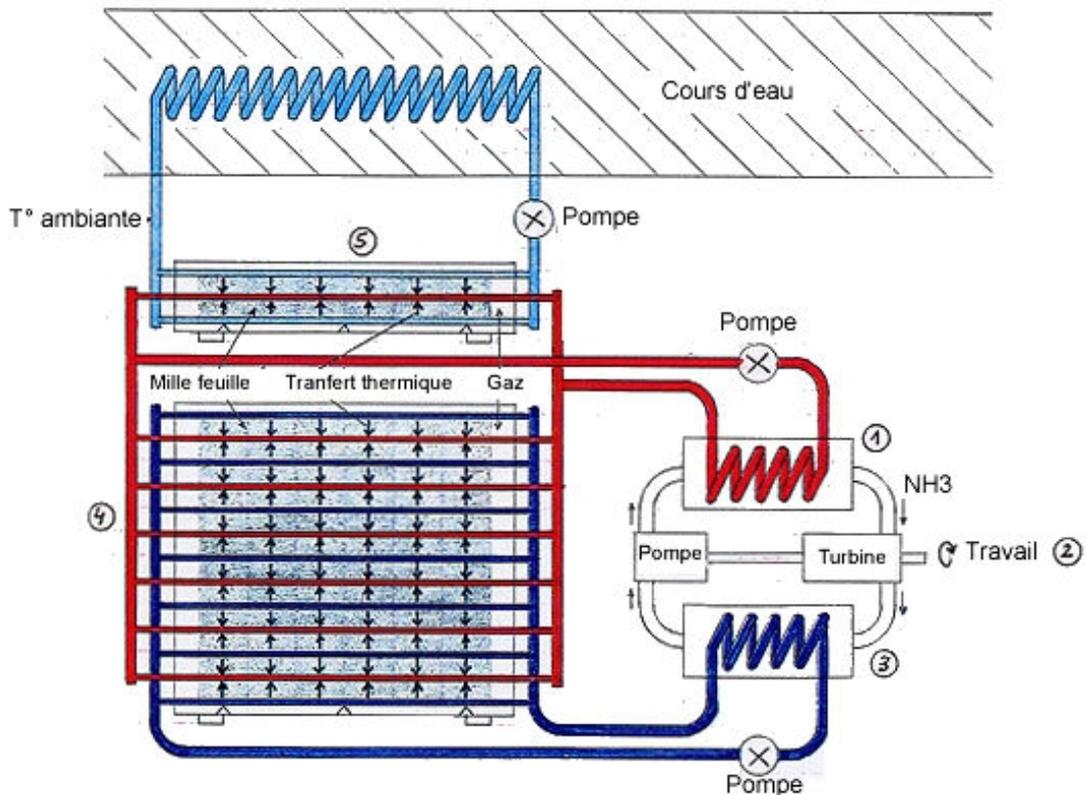
(4) Pour maintenir la température de la source froide, la pompe à chaleur doit « remonter » la chaleur écoulee par le moteur. Grâce à son COP élevé, elle peut le faire en n'utilisant qu'une petite partie du travail fourni par le moteur, au moyen d'un générateur raccordé au moteur. Mais, on pourrait aussi la faire fonctionner par le réseau électrique si le travail produit par la centrale n'est pas converti en électricité.

(5) Le rôle de la pompe auxiliaire est de prélever de la chaleur dans l'environnement pour l'introduire à la source chaude. C'est l'énergie qui sera convertie en travail. Mais, on pourrait aussi réchauffer directement la source froide au moyen d'un simple échangeur thermique (configuration schéma 45).

Puissance disponible

Chaque calorie prélevée dans l'environnement est intégralement convertie en travail. S'il s'agit d'un cours d'eau, chaque gramme d'eau débité et refroidi d'1°C fournirait 4,18 Joules (4,18 MW / m³/s). Une centrale qui refroidirait l'eau débitée du Rhin d'1°C donnerait 9196 MW en moyenne (débit moyen : 2200 m³/s). Le Rhône 7106 MW, la Loire 3300 MW, la Seine 1567 MW, la Garonne 836 MW.

④



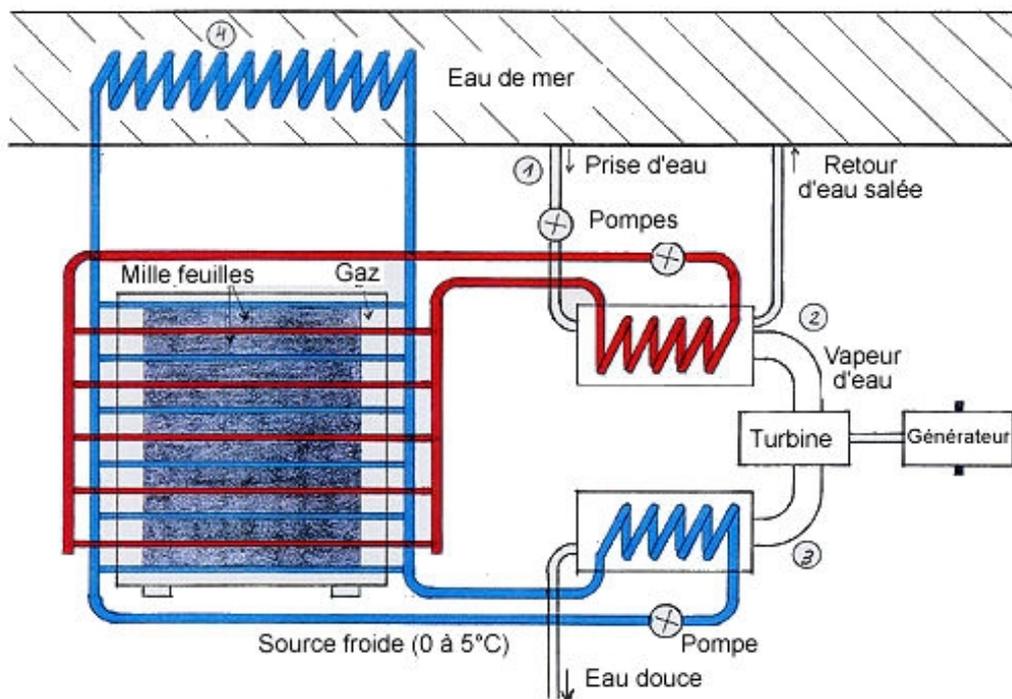
2) Centrale de production d'électricité et d'eau douce avec de l'eau de mer

Le principe est le même que dans la configuration précédente, excepté que le fluide de travail utilisé dans le moteur thermodynamique est cette fois-ci de l'eau de mer, avec production d'eau douce au condenseur. Cette possibilité a déjà été appliquée en Energie Thermique des Mers (Procédé Georges Claude), mais il fallait alors disposer d'une source chaude et d'une source froide, cette dernière étant réalisée par le réservoir d'eau froide et profonde des mers tropicales (environ 5°C - Lire à ce propos l'ouvrage illustré de Philippe Marchand : L'énergie Thermique des Mers, éditions IFREMER), tandis que la source chaude est constituée par l'eau de surface (20 à 25°C). Dans le cas présent, seule l'eau de surface suffit, et toutes les mers peuvent convenir.

Fonctionnement :

- (1) Une partie de l'eau destinée à réchauffer la source froide est déviée par une pompe vers l'évaporateur, où elle est réchauffée à la température de la source chaude.
- (2) Sous l'effet de la chaleur et de la dépression (l'évaporateur et le condenseur sont à 10 m au dessus du niveau de la mer) l'eau s'évapore. Pour éviter la formation de sel dans l'évaporateur, on introduit une quantité d'eau plus grande que celle à évaporer, de manière à pouvoir évacuer le sel avec le supplément d'eau.
- (3) La vapeur d'eau passe dans la turbine où elle se détend en produisant un travail. Puis elle pénètre dans le condenseur et se liquéfie en eau douce à la température de la source froide (entre 0 et 5°C – au dessous de cette température l'eau gèle).
- (4) Comme dans la configuration où on ne produit que de l'électricité, le système doit s'alimenter en chaleur prélevée dans l'environnement pour produire du travail. Dans le cas présent, l'eau de mer n'étant que légèrement plus chaude que la source froide, on peut réchauffer directement la source froide au moyen d'un simple échangeur thermique, ce qui évite la pompe à chaleur auxiliaire.

45



3) Générateur thermoélectrique

Le principe consiste à interposer un élément thermoélectrique entre la plaque chaude et la plaque froide de deux mille-feuilles voisins, l'élément thermoélectrique remplaçant la turbine et le générateur de la centrale thermodynamique. La disposition alternée de mille-feuilles et d'éléments thermoélectriques permet une circulation homogène et constante de la chaleur, comme indiqué sur les schémas ci-dessous. En effet, contrairement à la centrale thermodynamique où la chaleur de deux mille-feuilles juxtaposés devait converger vers la tuyauterie chaude, ici les mille-feuilles sont tous disposés dans le même sens pour faire circuler la chaleur dans le même sens. Les éléments thermoélectriques laissent la chaleur s'écouler de la partie chaude vers la partie froide en convertissant une petite partie en courant électrique, tandis que les mille-feuilles « remontent » cette chaleur de la partie froide vers la partie chaude. Ils recyclent donc la chaleur écoulee dans les éléments thermoélectriques pour la convertir intégralement en travail (électricité).

Fonctionnement

- Mise en route : A l'aide d'une batterie, on met en marche les mille-feuilles. La plaque chaude de chaque mille-feuille se réchauffe, et la plaque froide se refroidit. Pendant ce temps, la chaleur commence à s'écouler dans les éléments thermoélectriques selon un courant de plus en plus intense, ce qui produit de l'électricité.
- Les mille-feuilles recyclent la chaleur écoulee dans les éléments thermoélectriques, mais comme une partie est convertie en électricité, le système aurait tendance à se refroidir. D'où l'introduction de plaques métalliques soudées à l'échangeur thermique et coincées au milieu de chaque mille-feuille, dont le rôle est d'alimenter le système en chaleur ambiante prélevée par l'échangeur thermique.

Cette chaleur peut être apportée par un fluide (air, eau,...) ou bien un gaz en combustion, un rayonnement, la désintégration de radio-isotopes comme dans les convertisseurs thermoélectriques actuels, ou encore par simple conduction thermique avec un solide supportant l'appareil (ex : terre).

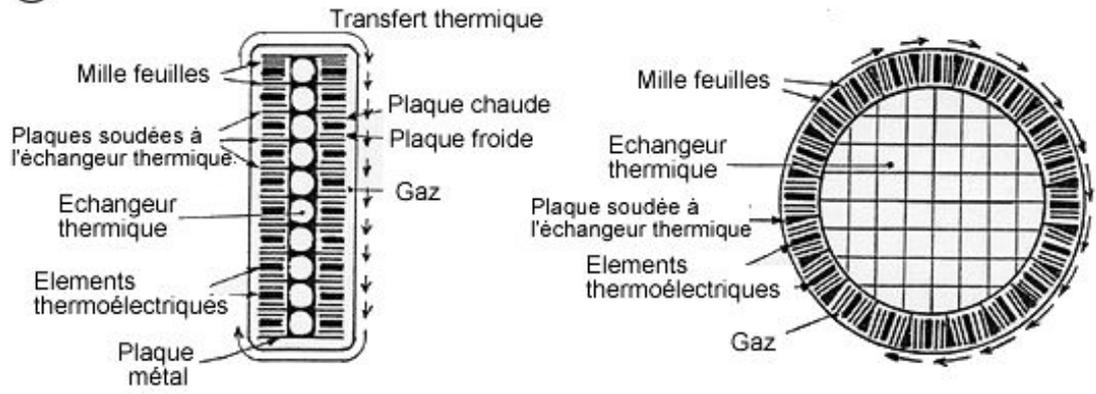
Applications :

Ce procédé convertit intégralement la chaleur en électricité, ce qui peut présenter un avantage considérable par rapport aux générateurs thermoélectriques actuels, qui eux n'en convertissent qu'une petite partie et dissipent une importante quantité de chaleur.

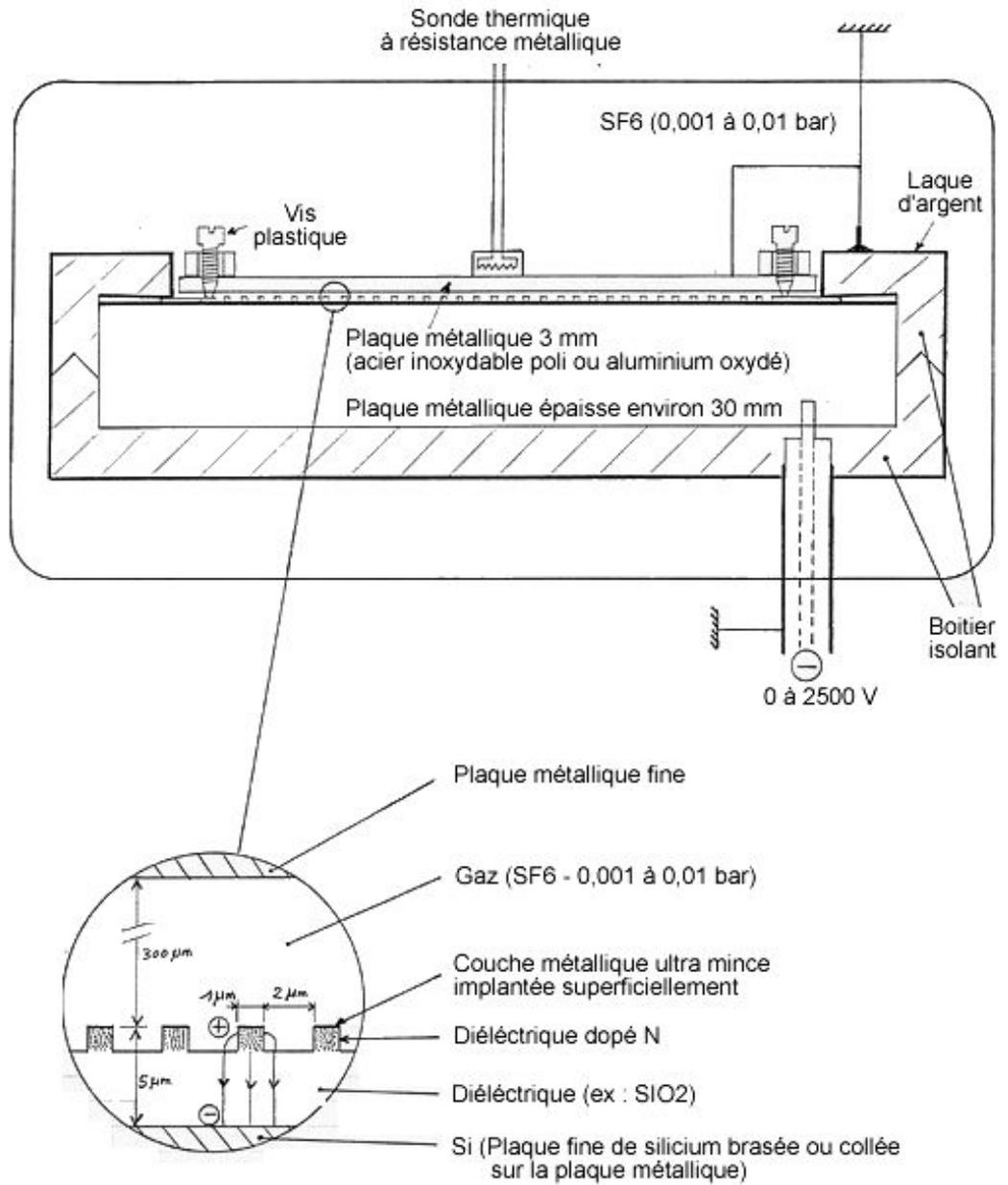
Applications :

- générateur pour satellite, station isolée, balise, bouée, météorologie...
- groupe électrogène , batterie pour moteur thermique, pile...

46



Expérience. Première possibilité. Configuration condensateur – grille non métallique



Avantages – difficultés

Cette configuration proche du modèle de référence vise à résoudre le problème d'effet de pointe que l'on aurait à proximité des arêtes d'une grille métallique. Un champ électrique très intense, de l'ordre de 10^{10} V/m, pourrait provoquer une autoionisation des molécules de gaz neutre, c'est à dire sans collision avec une autre particule, du seul fait de l'intensité du champ électrique à proximité des arêtes. Dans le cas présent, la charge positive serait incarnée dans la masse du diélectrique par l'implantation d'atomes donneurs. Ces atomes s'ioniseraient par l'application du champ électrique et les électrons s'écouleraient dans la couche métallique ultramince implantée superficiellement. La dose d'atomes donneurs serait calculée de manière à ce que la charge positive ne soit pas uniquement localisée en surface, comme avec un métal, mais qu'elle soit incarnée dans le volume du matériau de manière à éviter tout effet de pointe.

Concernant le risque d'émission d'ions positifs à partir de la grille, qui disperse le charge positive et affaiblit progressivement le champ électrique dans les trous de la grille, on peut supposer que l'utilisation d'un diélectrique serait préférable à celle d'un métal dont l'émission provient vraisemblablement de l'ionisation des gaz absorbés superficiellement. Si malgré tout, le problème demeure, une solution consisterait, pour rétablir le champ électrique dans les trous de la grille, à renverser momentanément la polarité du dispositif (charge négative sur la grille et charge positive sous le diélectrique). Une autre méthode consisterait, pendant que l'on supprime la tension dans le diélectrique, à émettre périodiquement des électrons sur toute la surface diélectrique pour décharger les ions positifs, grâce à une cathode froide fixée sur la face inférieure de la plaque fine.

Concernant le risque de claquage du diélectrique, le problème pourrait se résoudre de la manière suivante : on met la plaque sous tension dans la cuve sous vide. Si un claquage se produit, un point noir doit apparaître et permettre de localiser l'endroit du claquage. Il faudrait alors décaper la grille à cet endroit précis pour l'isoler du canal conducteur formé pendant le claquage, soit au moyen d'un canon ionique ou d'un laser.

La rigidité diélectrique sera d'autant plus élevée que les trous de la grille et son épaisseur seront petits, car on pourra réduire d'autant l'épaisseur du diélectrique. D'autre part, j'ai expérimenté une méthode au LCIE (Laboratoire Central des Industries Electriques à Paris) dans le but d'augmenter la rigidité diélectrique, basée sur la polarisation interfaciale. Elle consiste à interposer un isolant de faible résistivité (10^{10} à 10^{14} Ωcm) entre le métal de cathode et l'isolant de forte résistivité prévu pour être déposé sous la grille, en l'occurrence du Parylène (10^{17} Ωcm). Cette méthode a pour effet d'annuler pratiquement le champ électrique dans l'isolant de faible résistivité, et elle évite aussi l'injection électronique dans le Parylène, car la cathode n'est plus soumise qu'à un champ électrique très faible. L'expérience démontre, à champ électrique égal et à épaisseur égale de Parylène, une forte réduction du courant mesuré, de l'ordre de moitié, mais aussi une forte augmentation de la rigidité diélectrique, d'environ 70%.

Epaisseur des plaques

La plaque métallique épaisse (environ 30 mm) constitue la plaque chaude dite électrostatique. Son épaisseur doit lui procurer une inertie de température, c'est à dire un très faible réchauffement permettant de mesurer plus facilement le refroidissement de la plaque métallique fine (environ 3 mm).

Il est préférable de mesurer le refroidissement de la plaque fine pour bien mettre en évidence le transfert de chaleur entre les deux plaques, plutôt que le réchauffement de la plaque chaude qui pourrait être interprété de diverses manières.

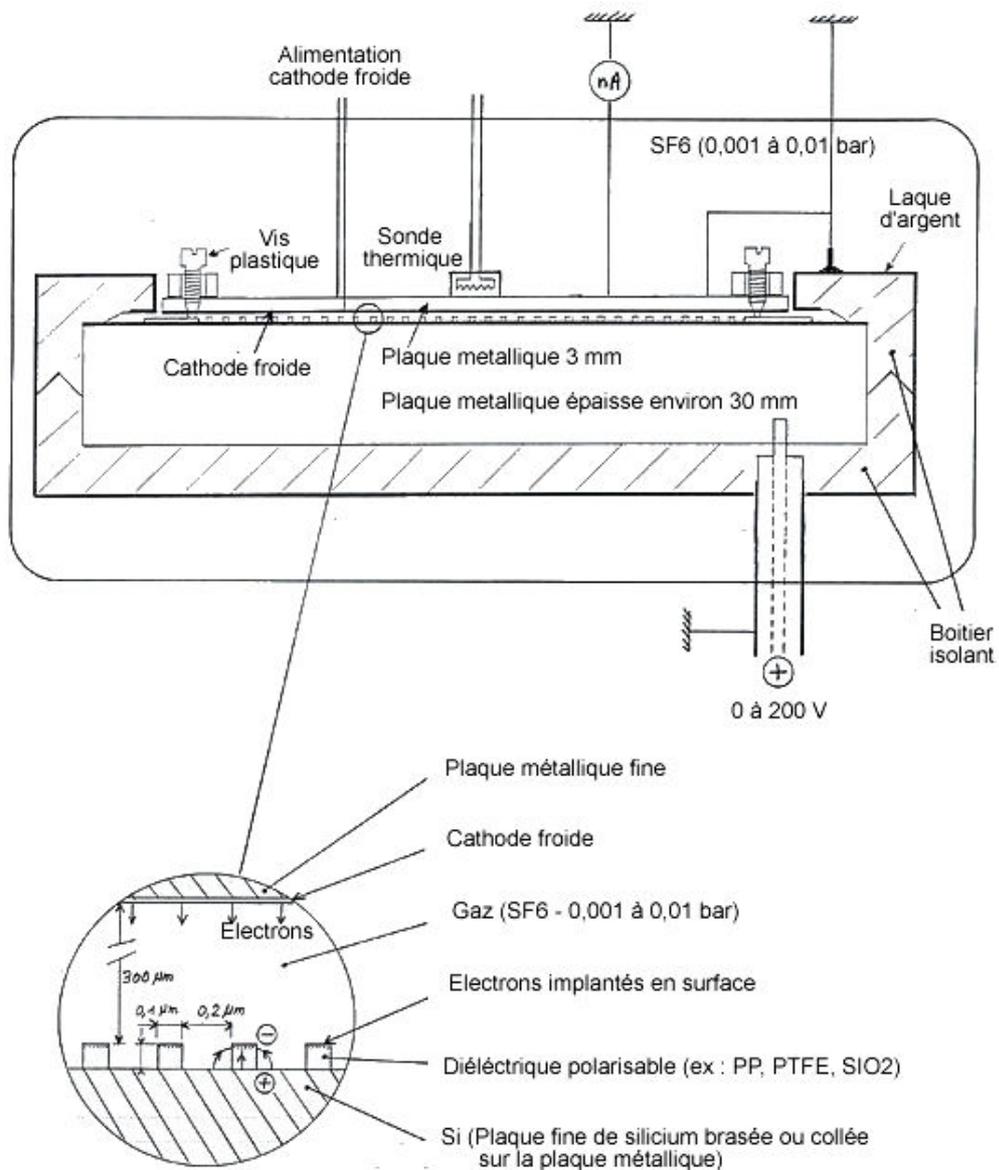
Rôle du boîtier isolant

Il est constitué de deux demi couvercles en plastique emboîtés l'un dans l'autre, et recouverts d'une couche de laque d'argent reliée à la masse (potentiel nul). Il est destiné à supprimer tout champ électrique en dehors du dispositif, de manière à éviter un claquage dans le gaz entre deux parties éloignées de potentiels différents.

Mesure du refroidissement

Le vide établi, on fait monter lentement la tension, puis à la tension voulue on introduit le gaz, d'abord à 0,001 bar. On doit alors constater un refroidissement de la plaque métallique fine, d'environ 1°C à 1250 V (250 KV/mm dans la Parylène, et 500KV/mm en surface), car il faut tenir compte du fait que les trous de la grille ne représentent que la moitié de la surface totale. Le refroidissement sera proportionnel au carré du champ électrique, par conséquent on aurait 4°C avec un champ de 500 KV/mm dans le Parylène, 16°C avec un champ de 1000 KV/mm. On notera ce refroidissement à différents instants après l'introduction du gaz pour connaître la vitesse de refroidissement et par suite la puissance de transfert thermique, puis la température d'équilibre lorsque le transfert s'annule.

Expérience. Deuxième possibilité. Configuration grille - électret



Avantages – difficultés

Des électrons sont émis à partir d'une cathode froide disposée sous la plaque fine, et s'implantent dans un matériau polarisable tel que PP, PTFE, ou SiO₂. En mettant la plaque épaisse sous tension positive et la plaque fine à la masse, on crée un champ électrique entre les deux plaques qui va attirer les électrons et provoquer leur implantation à une profondeur d'environ 10 nanomètres pour un potentiel de 100 Volts. La répartition uniforme des électrons implantés doit éviter une concentration beaucoup plus forte aux bords et un effet de pointe.

Contrairement à la configuration précédente, l'émission ionique à partir de l'anode, si elle a lieu, n'obligerait plus à stopper le fonctionnement du dispositif. Il suffit de faire fonctionner la cathode froide et de réimplanter des électrons.

La couche diélectrique devient trop mince pour claquer et la charge électronique implantée, qui est statique, contribue également à limiter le risque.

L'intérêt de cette configuration dépendra surtout de la difficulté à obtenir la charge voulue (0,01 Coulomb minimum / m²). Parmi les raisons de cette difficulté, une partie des électrons va tomber au bord de la grille et raser les flancs verticaux, ce qui risque d'ioniser le diélectrique et les électrons libérés seraient immédiatement aspirés dans le vide vers la surface de silicium en raison du champ électrique élevé dans cette zone.

Dans ce cas, il deviendrait impossible d'augmenter la charge de l'électret dès que le champ électrique dans les trous de la grille atteint un certain niveau. La solution la plus évidente consiste à réduire autant que possible l'énergie des électrons implantés, car d'elle dépend le pouvoir d'ionisation du diélectrique par les électrons. Une autre solution consisterait à implanter non pas des électrons, mais des ions négatifs à la surface d'un diélectrique microporeux. Le pouvoir d'ionisation par les ions est beaucoup plus faible, à basse énergie, que celui par les électrons.

Contrôle de la charge

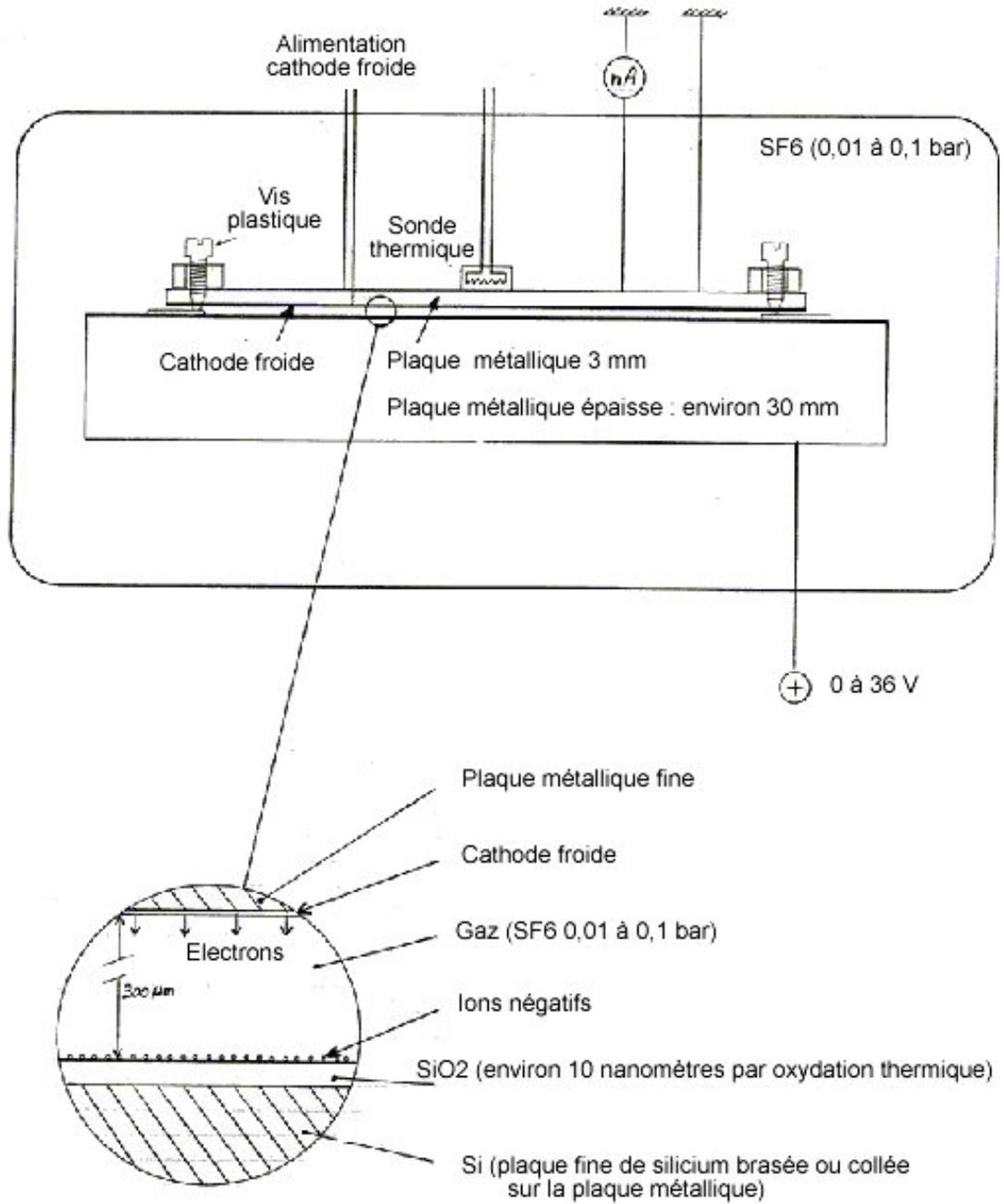
On pourra contrôler le niveau de charge de l'électret grâce au variateur de tension et un nano ou picoampèremètre. Pendant l'opération de chargement de l'électret, on met la tension nécessaire pour accélérer les électrons (ou les ions) à implanter. On estime le niveau de charge par la mesure du temps écoulé. Si on veut connaître le niveau exact, on coupe l'alimentation de la cathode froide puis on fait baisser lentement la tension, jusqu'à ce que le potentiel au niveau de la zone implantée s'annule puis devienne négatif. A cet instant, la plaque métallique fine doit commencer à se charger positivement et des électrons instables dans l'électret doivent remonter vers la plaque fine, ce que l'on doit détecter avec le nano ou picoampèremètre. Le niveau de tension à cet instant indiquera le niveau de tension dans l'électret, et par conséquent son niveau de charge et la valeur du champ électrique dans les trous de la grille.

Épaisseur des plaques – boîtier isolant – mesure du refroidissement : voir première possibilité.

Puissance électrique consommée

Elle dépendra essentiellement de la stabilité de la charge implantée. La durée de vie d'un électret conventionnel est de l'ordre du siècle, ce qui en gros revient à dire qu'il faudrait le recharger tous les siècles. Mais, dans le cas présent, le niveau de charge demandé serait au minimum 10 fois plus élevé que les électrets conventionnels les plus chargés, et en compensation on peut s'attendre à une diminution considérable de la stabilité. Imaginons le cas très défavorable où la durée de vie tombe à 10 secondes. Il faudrait donc recharger l'électret toutes les 10 secondes, ce qui induit un courant constant d'émission d'environ 10⁻³ Ampère/m². Avec un potentiel de 200 Volts, on aurait donc une puissance consommée de 0,2 Watts/m², ce qui est encore négligeable par rapport à la puissance de transfert thermique à attendre.

Expérience troisième possibilité. Configuration avec les ions en surface.
Voir page 16.



Production des ions

Le vide établi, on introduit le gaz (ex : SF₆ à 0,01 bar) puis on alimente la cathode froide tout en établissant une tension positive sur la plaque métallique épaisse qui va attirer les électrons et les ions négatifs produits par l'émission électronique de la cathode froide. Les ions négatifs vont venir se déposer sur la couche diélectrique de silice. On alimente la cathode jusqu'à obtenir dans la couche un champ électrique de 250 à 500 KV/mm, soit une tension de 2,5 à 5 Volts pour une couche de 10 nanomètres, et une densité d'ions de 0,01 à 0,02 Coulomb/m² correspondant à une distance de 3 à 4 nanomètres entre deux ions voisins.

Contrôle de la charge

Comme dans la configuration avec l'électret, on pourra contrôler la charge grâce au variateur de tension et un nano ou picoampèremètre. Pendant que la plaque se charge, la tension doit être maximum (36 V) pour attirer les ions négatifs. Si l'on veut connaître le niveau de charge, on coupe l'alimentation de la cathode froide puis on fait baisser la tension de la plaque, jusqu'à ce que le potentiel au niveau de l'interface gaz-silice s'annule puis devienne négatif. A cet instant la plaque métallique fine doit commencer à se charger positivement et des ions négatifs doivent remonter vers la plaque fine, ce que l'on doit détecter avec le nano ou picoampèremètre ; le niveau de tension à cet instant indiquera le niveau de tension dans la couche diélectrique et le niveau de charge.

Nature du gaz

Les qualités du gaz doivent être :

- une bonne polarisabilité (ou susceptibilité diélectrique : $\epsilon_r - 1$) car d'elle dépend l'accélération de la molécule dans le champ électrique d'un ion.
- Une forte électronégativité pour produire un ion stable, c'est à dire qui retienne fortement l'électron sur la couche diélectrique.

Pour réunir plus facilement ces deux qualités, il serait peut-être judicieux, au lieu d'utiliser un seul gaz, de mélanger deux gaz, l'un majoritaire qui serait doué d'une bonne polarisabilité, et l'autre minoritaire qui serait doué d'une forte électronégativité.

Durée de vie des ions négatifs et puissance consommée

Concernant la stabilité ou durée de vie des ions négatifs, il faut considérer le rôle de barrière électronique réalisé par l'interface silice-gaz, du à la très forte résistivité de la silice, de l'ordre de $10^{17} \Omega\text{cm}$ si elle est bien sèche. Il faudra éliminer le maximum d'eau en faisant un vide poussé avant l'expérience, ou bien en étuvant, ou encore en utilisant en silicagel (gel de silice).

Avec une résistivité de $10^{17} \Omega\text{cm}$ et un champ électrique de 500 KV/mm (5×10^6 V/cm) on aurait un courant de 5×10^{-11} A/cm² soit 5×10^{-7} A/m². Même si l'instabilité des ions induisait un courant 10 000 fois plus intense, ce qui est peu probable, on aurait seulement 5×10^{-3} A/m², et une puissance électrique consommée de 0,2

Watt/m² pour un voltage total d'environ 40 Volts, ce qui est encore négligeable par rapport à la puissance de transfert thermique à attendre.

Epaisseur des plaques – Mesure du refroidissement : voir première possibilité.

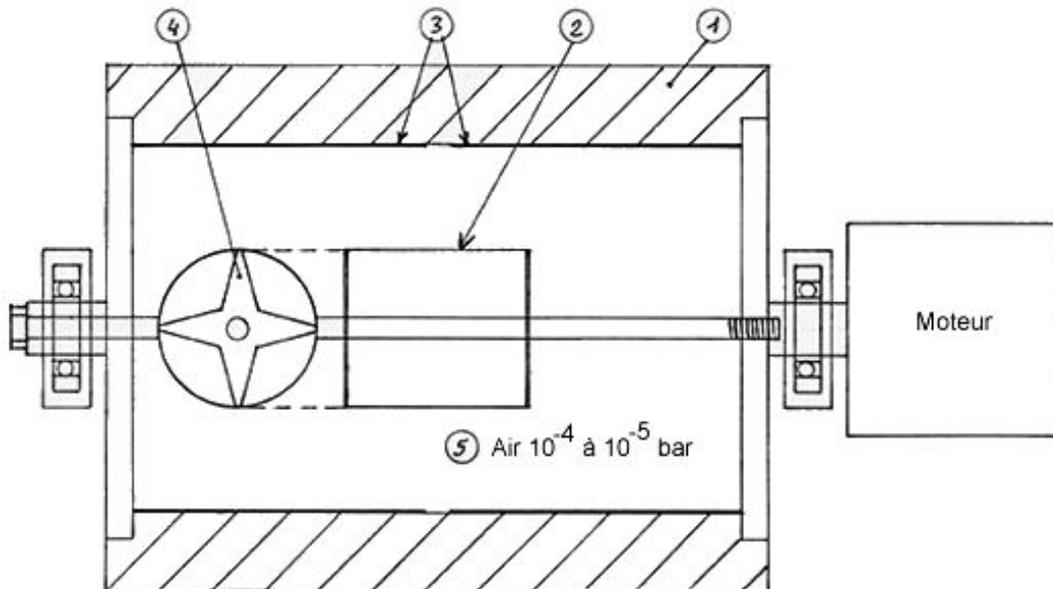
Avantages – difficultés

Cette configuration présente des avantages incontestables par rapport aux deux configurations précédentes, ne serait-ce que la simplicité de réalisation. Cependant, elle présente aussi des inconnues qui peuvent rendre l'analyse très difficile ou impossible en cas d'échec de l'expérience : Est-ce que la distance d'attraction des molécules par les ions, de l'ordre de 2 ou 3 nanomètres, serait suffisante ? Est-ce que les ions resteraient parfaitement en surface ou s'enfouiraient-ils de quelques nanomètres dans le diélectrique ? Dans le dernier cas, la zone d'attraction serait elle aussi enfouie et deviendrait inopérante. Est-ce que la surface diélectrique serait suffisamment plane et compacte à l'échelle d'un ion, à l'image d'une balle de golf sur un terrain de golf ? Si elle ressemble plutôt à un champ de labour, les ions s'enfouiront et leur champ électrique sera inaccessible pour les molécules de gaz.

Autres configurations

Les autres configurations où l'on produit une zone très mince de champ électrique sans générateur (mélange de grains très fins de deux matériaux de potentiels de surface différents, grille ultrafine, surface microporeuse) peuvent être qualifiées de futuristes. Elles ne semblent pas indiquées pour tenter une expérience, mais elles devraient faire l'objet de recherches dès que l'une des configurations aura démontré que le procédé fonctionne.

Expérience préliminaire pour mettre en évidence la variation de température dans un gaz soumis à un champ d'accélération.



Un premier pas vers l'admission du concept de l'invention pourrait être franchi par la réalisation de cette expérience. Il s'agit seulement de démontrer que dans un gaz en équilibre thermodynamique où réside un champ d'accélération (ou champ d'attraction), règne non seulement un gradient de pression, mais aussi de température.

L'expérience consiste à faire tourner une toupie à grande vitesse (10 000 à 15 000 tours/minute), c'est à dire un cylindre en verre creux muni en son axe d'un cylindre en plastique mince, pour produire un champ d'accélération centrifuge capable de refroidir le cylindre en plastique de quelques degrés (en fonction de la vitesse, du diamètre du cylindre en verre et du cylindre en plastique). Cette expérience est en mesure d'ouvrir une brèche dans le principe Zéro de la thermodynamique, lequel principe indique que deux objets en contact, même par l'intermédiaire d'un gaz, tendent à se mettre à la même température (Postulat de Clausius). Ce ne serait donc plus vrai s'il règne dans le gaz un champ d'accélération perpendiculaire à la couche de gaz. C'est cette brèche, ce caractère non absolu du principe Zéro, qui serait à l'origine de la contradiction avec le second principe de la Thermodynamique dans l'invention.

(1) Cylindre en verre : c'est la plaque chaude. Il doit être assez épais pour limiter autant que possible son réchauffement pendant l'expérience, afin de mesurer le plus précisément possible le refroidissement du cylindre en plastique mince. Il faut tenir compte du frottement dans les roulements et des vibrations qui tendront à réchauffer le cylindre en verre par l'intermédiaire des plaques latérales rondes métalliques. Si ces déperditions d'énergie induisent un réchauffement trop rapide du cylindre en verre, la mesure du refroidissement du cylindre en plastique sera difficile. Une des solutions possibles consisterait à mesurer également la température du cylindre en verre et de calculer le refroidissement du cylindre en plastique par comparaison entre les deux températures.

(2) Cylindre en plastique d'1 millimètre d'épaisseur, ou moins si possible. Il s'agit de réduire au maximum la capacité calorifique du cylindre de manière à ce qu'il se mette le plus rapidement possible à la température de l'air avec lequel il est en contact.

(3) Couche métallique mince déposée sous vide sur le verre poli. Etant donné l'éloignement important entre les plaques chaude et froide, c'est à dire entre les deux cylindres, la puissance de transfert thermique par conduction dans le gaz serait du même ordre de grandeur que la puissance de transfert thermique par rayonnement s'il s'agissait de deux corps noirs. Pour limiter le retour de chaleur par rayonnement sur le cylindre en plastique, il faudra donc enduire le cylindre en verre poli d'une couche métallique mince de manière à réduire l'émissivité du verre, en laissant une bande étroite au milieu du cylindre (entre les deux flèches repérées (3)) qui permettra, par la transparence du verre, de lire la température du cylindre en plastique par procédé optique.

(4) Rondelles en plastique de maintien du cylindre. Elle seront découpées tel que décrit sur le schéma pour réduire au maximum le contact avec le cylindre et par conséquent le pont thermique entre l'axe métallique (chaud) et le cylindre (froid). Toujours dans le but de réduire le transfert thermique entre l'axe métallique et le cylindre en plastique, l'axe métallique sera de faible diamètre, et il serait préférable qu'il soit poli pour limiter au maximum le transfert thermique par rayonnement.

(5) Pression d'air
Avec un gaz à pression atmosphérique, on risque d'avoir un réchauffement du cylindre en plastique par convection, dans laquelle l'air en contact avec les parois métalliques latérales se réchaufferait et convergerait vers le centre du cylindre en verre pour aller réchauffer ensuite le cylindre en plastique. La meilleure solution pour échapper à ce problème consiste à introduire l'appareil dans une cuve que l'on mettrait sous vide, de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-5} bar (lpm = 0,5 à 5 mm). A cette pression, la densité des molécules de gaz devient si faible que les mouvements de convection n'ont plus lieu, et la puissance de transfert thermique par conduction dans le gaz n'en serait que faiblement réduite.

Les calculs géométriques qui suivent ont pour but de calculer le refroidissement du cylindre en plastique mince, et de démontrer que l'on obtiendrait bien l'effet attendu avec un gaz raréfié. En donnant arbitrairement la valeur de 100 pour la vitesse

relative moyenne entre une molécule et la paroi à son point de départ, on cherche à connaître la vitesse relative entre la molécule et la paroi à son point d'impact (repéré O sur la circonférence du cercle intérieur ou extérieur du schéma) en supposant qu'il n'y a pas de collision intermoléculaire entre les deux parois. On propose que la vitesse linéaire de la paroi intérieure du cylindre extérieur soit égale au cinquième de la vitesse moyenne d'une molécule, ce qui est représenté par un trait de 20mm sur le schéma, et 10 mm pour la vitesse linéaire de la paroi du cylindre intérieur dont le rayon est deux fois plus petit.

La vitesse absolue de la molécule (V_a) est la vitesse mesurée par un observateur immobile. Elle n'évolue pas pendant le trajet de la molécule entre les deux parois. On la détermine en traçant un parallélogramme dont la longueur du petit côté correspond à la vitesse de la paroi, et la longueur du grand côté à la vitesse relative entre la molécule et la paroi. En recombinaison des vitesses sur le point d'impact au moyen d'un autre parallélogramme, on peut trouver la vitesse relative entre la molécule et la paroi à son point d'impact. J'ai ainsi cherché à connaître la variation de la vitesse relative entre les deux parois, selon trois directions différentes. Les mesures ont été faites sur une table à dessin professionnelle où j'ai tracé des parallélogrammes trois fois plus grands que ceux des présents schémas, de manière à augmenter la précision des mesures. J'ai ensuite divisé toutes les dimensions mesurées par trois pour les retranscrire sur les présents schémas.

Dans le passage d'une molécule de la paroi du cylindre intérieur à celle du cylindre extérieur, on constate que la vitesse relative entre la molécule et la paroi du cylindre extérieur ($VR_{m.C}$) augmente d'environ 1,5% par rapport à la vitesse relative entre la molécule et la paroi du cylindre intérieur ($VR_{m.c}$) soit une augmentation de 3% de l'énergie cinétique de la molécule puisqu'elle augmente comme le carré de sa vitesse ($1,015^2 = 1,03$), ce qui donne un échauffement d'environ 9°C pour un gaz rare ($300K \times 0,03$), et environ 5,5°C pour l'air puisque l'énergie de translation d'une molécule d'air ne représente que les trois cinquièmes de son énergie totale, le reste étant de l'énergie de rotation. Il est remarquable que l'augmentation de la vitesse relative est identique dans les trois directions étudiées. Dans le passage d'une molécule de la paroi du cylindre extérieur à celle du cylindre intérieur, la vitesse relative baisse d'environ 1,5% dans les trois directions, soit une baisse de 3% de l'énergie cinétique.

Par conséquent, dans cet exemple l'équilibre thermodynamique s'établirait lorsque la paroi du cylindre intérieur est plus froide que celle du cylindre extérieur, de 9°C pour un gaz rare et de 5,5°C pour l'air, en négligeant les différentes causes de retour de chaleur évoquées plus haut. De ce fait, l'écart de température sera moins important dans la réalité. Les calculs montrent que l'augmentation ou la diminution de la vitesse relative d'une paroi à l'autre varie comme le carré de la vitesse de la toupie.

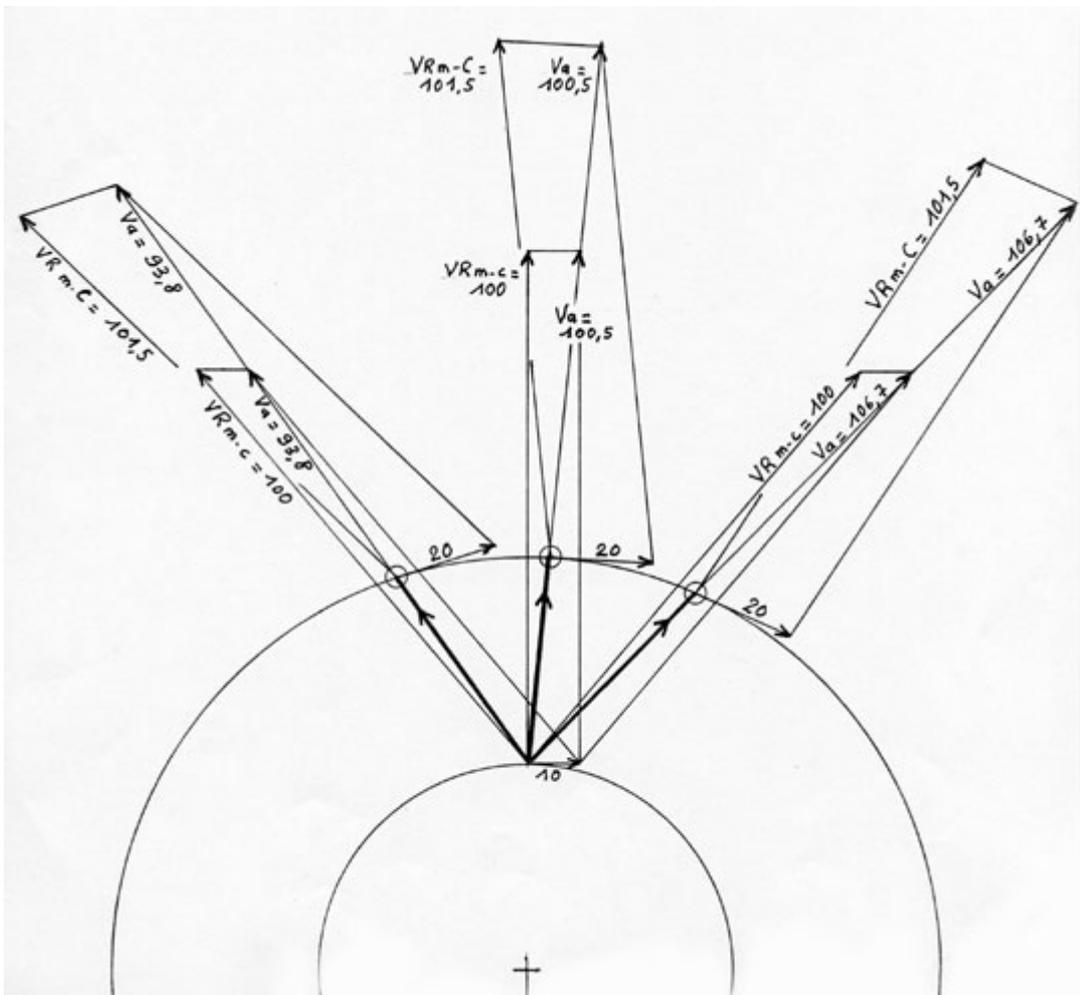
D'une manière générale, ce calcul démontre qu'une molécule se dirigeant vers le cylindre extérieur voit sa vitesse relative et son énergie cinétique augmenter tandis qu'elles diminuent lorsque la molécule se dirige vers le cylindre intérieur, et ceci en fonction de l'éloignement ou du rapprochement de la molécule par rapport à l'axe de la toupie en mouvement. Par exemple, si l'on mesure l'augmentation de la vitesse relative depuis la paroi du cylindre intérieur jusqu'à un impact intermédiaire entre les deux parois, solidaire de la toupie, puis de cet impact intermédiaire jusqu'à la paroi du cylindre extérieur, les deux augmentations réunies correspondent à celle que l'on a lorsque la molécule passe directement d'une paroi à l'autre. Par conséquent, l'écart

de température entre les parois ne variera pas en fonction du libre parcours moyen d'une molécule dans le gaz, c'est à dire en fonction de la densité du gaz. S'il y a une variation de cet écart, elle sera certainement provoquée par les mouvements de convection que j'ai décrits plus haut. (Voir Pression d'air)

Passage d'une molécule du cylindre intérieur au cylindre extérieur.

$$\frac{VR_{m.C}}{VR_{m.c}} = 1,015$$

Dans les trois directions la vitesse relative augmente d'1,5% soit une augmentation de 3% de l'énergie cinétique.



Passage d'une molécule du cylindre extérieur au cylindre intérieur.

$$\frac{VR_{m.c}}{VR_{m.C}} = 0,985$$

Dans les trois directions, la vitesse relative baisse d'environ 1,5%, soit une baisse de 3% de l'énergie cinétique.

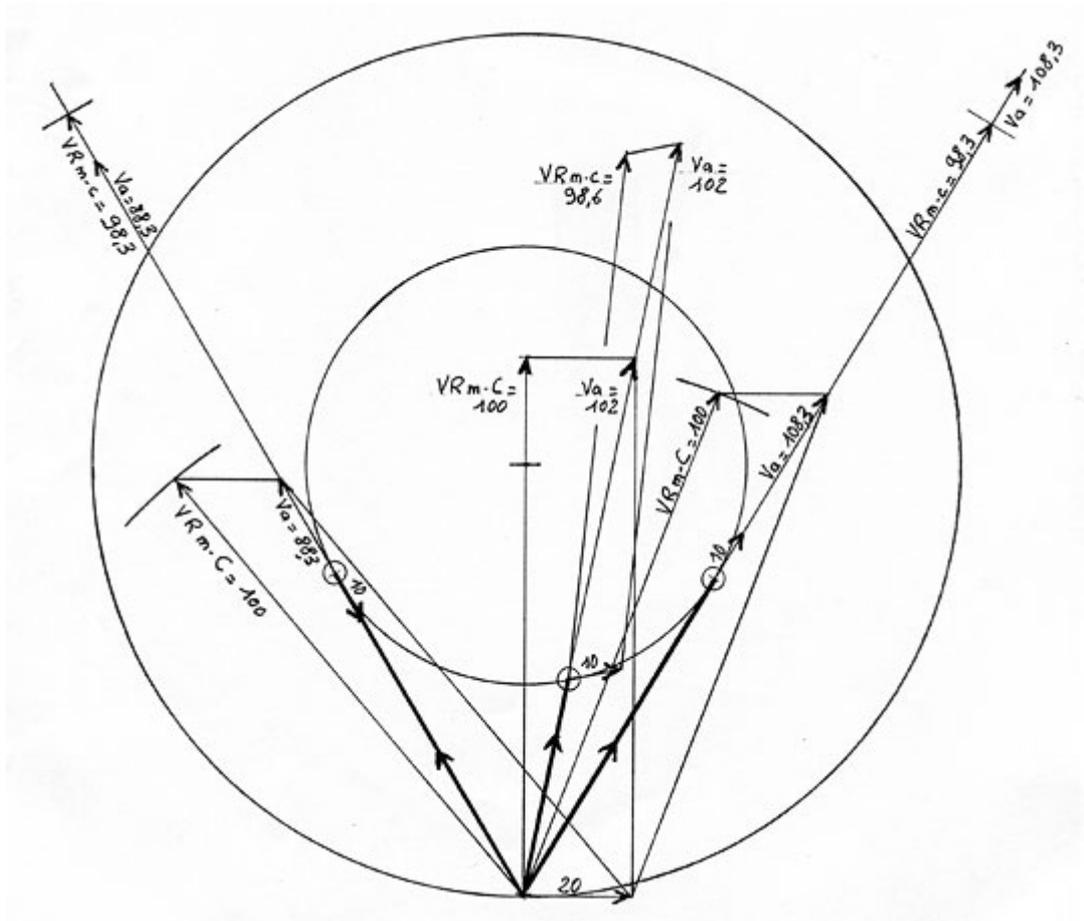
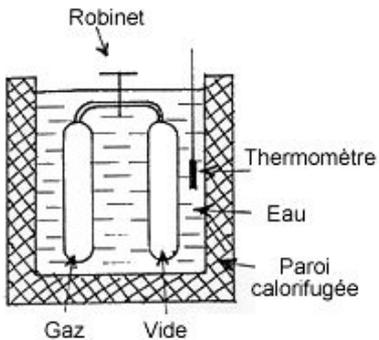


Illustration du principe par l'expérience de Joule



Il s'agit d'une expérience dans laquelle on laisse se détendre un gaz d'un compartiment à un autre, reliés par un orifice étroit comme indiqué sur le schéma ci-contre. Quelques instants après que le gaz soit réparti dans les deux compartiments, on mesure la température et on la compare avec ce qu'elle était avant.

Gaz parfait :

On constate qu'elle reste inchangée pour un gaz parfait, dans lequel n'intervient pas d'attraction intermoléculaire (interactions de Van der Waals). Ceci se comprend par le simple fait qu'aucune énergie n'est libérée à l'extérieur du système, contrairement à ce qui se produit dans un moteur où le gaz cède de l'énergie au piston, qui la convertit en travail.

Gaz imparfait :

Il n'en est pas de même avec un gaz imparfait où l'on constate un refroidissement après la détente, lequel est dû à l'augmentation du volume occupé qui éloigne les molécules les unes des autres. En effet, lorsque deux molécules d'un tel gaz s'approchent suffisamment l'une de l'autre, elles s'attirent mutuellement, elles tombent sur elles-mêmes comme dans un trou et voient leur énergie cinétique, donc leur température, augmentée. Par conséquent, lorsque le gaz se détend, le libre parcours moyen des molécules augmente et les molécules « tombent » moins fréquemment, leur niveau moyen d'énergie cinétique est moins élevé et le gaz est moins chaud.

Attracteurs naturels et artificiels

Les molécules se comportent entre elles comme des attracteurs. On voit ainsi que l'on pourrait faire varier la température du gaz si l'on pouvait diminuer ou augmenter le rôle de ces attracteurs, c'est à dire faire varier la fréquence des interactions. On ne peut pas faire en sorte que les molécules se rencontrent plus ou moins souvent, par contre on peut rajouter des attracteurs artificiels. L'invention repose exactement sur ce principe. En fixant des attracteurs à la surface d'une paroi, qui peuvent être une grille métallique chargée comme dans la configuration expérimentale, des ions, un mélange de très fines particules de deux potentiels de surface différents, ou encore une surface microporeuse, on augmente l'énergie des particules qui viennent frapper la paroi et on la chauffe.

<p>Comparaison du présent procédé avec le procédé basé sur une diode à vide</p>

Certains m'ont dit que mon procédé ressemblait à celui basé sur une diode à vide, dans laquelle une cathode à très faible potentiel d'extraction se refroidit sous l'effet de l'émission des électrons, et ne voyaient pas très bien pourquoi le présent procédé consommerait moins d'énergie.

Dans les deux procédés, on retrouve en effet des particules qui transfèrent de l'énergie d'une plaque froide à une plaque chaude qui lui fait face, grâce à une force d'accélération des particules. Dans la diode à vide, ce sont des particules chargées (électrons) accélérées par un champ électrique. Dans le présent procédé, ce sont des particules électriquement neutres (molécules de gaz) qui se polarisent en pénétrant dans un champ électrique localisé à la surface de la plaque dite « électrostatique », et qui de ce fait sont attirées vers la plaque.

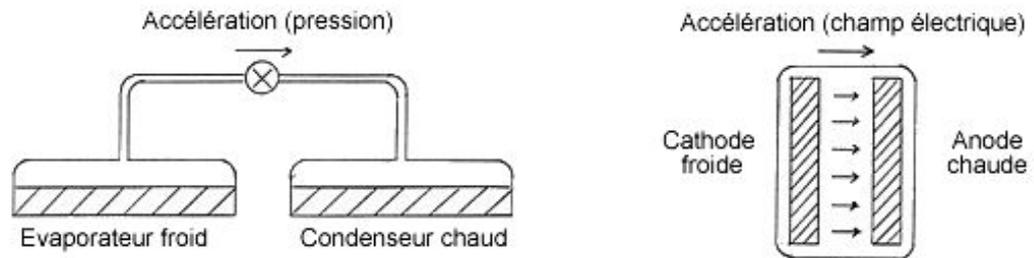
Pourquoi n'y a-t-il plus d'énergie consommée avec ce principe d'accélération ? En effet, dans un dispositif idéal où l'isolation électrique serait parfaite, ou bien dans une configuration où l'on produit un champ électrique sans générateur, une molécule se polarise et se laisse attirer dans le champ électrique mais, après avoir frappé la plaque et cédé de l'énergie par accommodation thermique, elle rebondit, se dépolarise en sortant du champ électrique et par conséquent ralentit en subissant la même énergie d'attraction. Il n'y a donc plus d'énergie globalement dépensée ($W=0$ – Se souvenir de l'image du ballon tombant sur une planète, mentionnée plus haut). Le seul effet recherché est que la molécule sorte du champ électrique avec une énergie cinétique inférieure à celle qu'elle avait avant de pénétrer dans le champ électrique, comme si elle frappait une plaque ordinaire froide.

Par contre, dans la diode à vide le transfert de chaleur d'une plaque à l'autre est conditionné par l'accélération des électrons de la cathode froide vers l'anode chaude.

Le travail d'accélération des électrons de la cathode vers l'anode est rendu nécessaire par le fait que la cathode froide émet plus difficilement des électrons que l'anode chaude. En effet, le courant électrique ne peut circuler librement (sans résistance) qu'à la condition que les deux électrodes soient à la même température. Dès que la cathode est plus froide que l'anode, elle émet plus difficilement des électrons que l'anode, de telle sorte qu'il y aurait un retour d'électrons de l'anode vers la cathode si on supprimait le champ électrique accélérateur (c'est le principe d'un générateur thermoionique). Il faut donc compenser cette « difficulté » d'émission de la cathode par l'accélération des électrons vers l'anode.

On peut faire une analogie simple avec une pompe à compression mécanique en remplaçant la cathode par l'évaporateur, et l'anode par le condenseur (voir schémas ci-dessous). Lorsque l'évaporateur et le condenseur sont à la même température, on peut faire circuler librement (sans résistance) de la vapeur d'un compartiment à l'autre. De ce flux de vapeur va résulter qu'il y a dans

l'évaporateur un nombre plus important de molécules qui s'évaporent (que de molécules qui se condensent) et dans le condenseur un nombre plus important de molécules qui se condensent (que de molécules qui s'évaporent). L'évaporateur va donc se refroidir et le condenseur se réchauffer. Dès lors, les molécules s'évaporent plus difficilement dans l'évaporateur froid, de telle sorte qu'il y aurait un retour de vapeur du condenseur vers l'évaporateur si on libérait le passage entre les deux compartiments (c'est le principe du moteur thermodynamique). Il faut donc « accélérer » les molécules vers le condenseur, ce qui signifie en pratique qu'il faut créer une dépression dans l'évaporateur grâce à une pompe.



Le présent procédé ne rentre plus dans ce schéma. La grande différence avec tous les procédés existant peut s'exprimer de la manière suivante : le fluide de travail, en l'occurrence du gaz polarisable, SF₆ ou autre, ne subit plus de cycle de changements d'états thermodynamiques. Par exemple, dans la pompe à compression mécanique le fluide s'évapore dans l'évaporateur froid, puis se liquéfie dans le condenseur chaud. La température, la pression et l'état de la matière sont changés en changeant de compartiment. Idem pour la diode à vide : le fluide électronique « s'évapore » à la cathode froide, puis « se condense » à l'anode chaude. La température, mais aussi la « pression électronique » s'élèvent en passant de la cathode à l'anode. Le fluide électronique subit donc un changement d'états thermodynamiques.

Dans le présent procédé, il n'y a plus de tel cycle de changements d'états thermodynamiques, par contre plusieurs états thermodynamiques coexistent dans le gaz, la pression et la température étant plus élevées contre la plaque électrostatique, de même que dans l'atmosphère, la pression et la température diminuent au fur et à mesure que l'on s'élève en altitude. Le gaz peut être en équilibre thermodynamique malgré ces différences de température et de pression. Dans le procédé, le transfert de chaleur provient du déséquilibre thermodynamique que l'on crée dans le gaz en réduisant la différence de température entre les plaques par rapport à celle que l'on aurait du seul fait du champ d'attraction. Cette réduction peut se faire, par exemple, en refroidissant la plaque chaude ou en réchauffant la plaque froide (ou les deux à la fois).

Il convient de remarquer aussi que si les particules ne subissent plus collectivement un cycle de changements d'états, il subsiste un cycle individuel ou moléculaire qui remplit exactement la même fonction. C'est à dire qu'on ne peut plus suivre un groupe de particules dont la pression et la température augmentent dans un compartiment, éventuellement avec un changement d'état de la matière, puis retournent à l'état initial dans un autre compartiment, etc ; mais, chaque

molécule de gaz située entre les plaques effectue à tout instant une phase ou une autre d'un cycle dit moléculaire, en totale indépendance par rapport aux molécules voisines telle molécule étant accélérée en pénétrant dans le champ électrique, pendant que telle autre cède de l'énergie par accommodation thermique sur la plaque chaude, pendant que telle autre ralentit en sortant du champ électrique, ou encore pendant que telle autre reprend de l'énergie par accommodation thermique sur la plaque froide. Toutes les phases du cycle s'effectuent en même temps sans qu'il soit possible de détecter un mouvement macroscopique, comme cela l'était dans tous les procédés existant jusqu'ici.

Pourquoi une invention sur Internet ?

Après avoir lu ces pages, j'espère au moins que le lecteur reconnaîtra l'espoir dont cette idée est porteuse. Pour ma part, je reconnais que le défi est considérable, mais au regard des moyens techniques dont nous disposons aujourd'hui, je crois qu'il est beaucoup plus facile à relever que celui d'autres grandes inventions en leur temps, tel que le moteur à vapeur ou à explosion par exemple. Et que dire de l'aviation, qui représentait non seulement une prouesse technologique, les moteurs de l'époque n'étant pas assez puissants par rapport à leur poids, mais aussi un défi scientifique.

Incontestablement, la solution passe par une recherche publique, où chaque entreprise, chaque organisme ou institut, chaque chercheur, aurait la possibilité de participer au lancement du projet. Aussi, dans cette logique, Internet apparaît-il comme la solution idéale pour diffuser un projet comme celui-ci. Mais, ce canal d'informations présente un avantage tout à fait nouveau. Un espace sur le site est disponible pour tous ceux qui souhaitent intervenir, donner un avis, poser une question (ou y répondre) ou encore proposer leurs services. Il devient possible à ceux qui le souhaitent de se concerter directement pour réunir toutes les données, moyens matériels, financiers, et les compétences nécessaires au lancement du projet. Si donc, vous souhaitez y participer d'une manière ou d'une autre, vous pouvez le faire savoir publiquement en m'envoyant par courrier, fax ou courrier électronique, une note avec votre en-tête que j'introduirai directement sur le site dans la rubrique « Courrier des lecteurs ». Vous pouvez également utiliser le forum de discussion.

Je propose enfin de céder le brevet français à toute personne apte et disposée à promouvoir le projet de la meilleure façon qui soit.

Je remercie tous ceux qui voudront bien s'intéresser à ce projet, y consacrer un peu de leur temps, leurs compétences, leur énergie et leurs talents.

Il est possible que vous disposiez d'un forum de discussion sur Internet et que vous souhaitiez discuter de mon projet dans votre forum. Dans ce cas, il me semble intéressant que vous me communiquiez l'adresse de votre forum que j'introduirai dans la rubrique « Forum où la PACES est discutée ».

Brevet français

Numéro de publication : 2 775 340

Brevet PCT

Numéro de publication : WO 99 / 43 995

