

Devoir Maison 11

Mécanisme de déclenchement de l'étincelle

L'amorçage d'une décharge électrique dans un gaz (ou le claquage du gaz) est la transition de l'état isolant vers un état conducteur du milieu. Le mécanisme d'apparition d'une étincelle, parfois nommé arc électrique, est une sorte de phénomène d'avalanche se produisant dans le gaz au départ non ionisé. Initialement quelques électrons dits électrons primaires peuvent s'extraire de l'électrode par agitation thermique. Ces électrons vont alors être fortement accélérés par le champ électrique régnant entre les électrodes avant de frapper des molécules de dioxygène ou de diazote.

Ces chocs peuvent, dans certains cas, arracher des électrons aux molécules et créer des cations. Ces électrons secondaires de plus en plus nombreux au cours des chocs successifs vont eux aussi être accélérés sous l'action du champ électrique régnant dans le gaz. Cette action motrice du champ électrique est contrecarrée par les chocs des électrons sur les molécules. L'effet dominant dans les conditions expérimentales considérées est dû aux chocs électrons-particules lourdes (atomes ou molécules). Un processus de capture d'électrons par les cations va rapidement limiter le nombre d'électrons secondaires en mouvement. Nous considérons dans ce problème un gaz faiblement ionisé dans lequel le nombre de particules lourdes (molécules et cations) est très grand devant le nombre d'électrons en mouvement. On négligera donc systématiquement le nombre de cations devant le nombre de molécules gazeuses. De plus ce plasma est pratiquement électriquement neutre vu la très faible proportion électrons primaires/électrons secondaires.

Effet d'avalanche lors du déplacement d'un électron dans un gaz soumis à un champ électrique

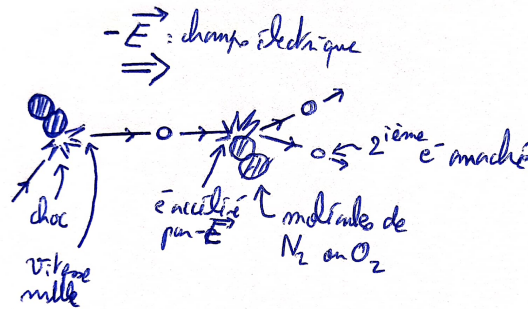
L'effet d'avalanche se produit lorsque le champ électrique atteint une valeur critique, dit champ disruptif et noté $E_d = 3,6 \times 10^6 \text{ V.m}^{-1}$. Il s'agit, dans cette partie, de relier cette grandeur expérimentale macroscopique aux paramètres microscopiques du gaz.

Lorsque le gaz est placé dans une zone où règne un champ électrique \vec{E} que l'on peut supposer uniforme, le mouvement des électrons, qui sont les porteurs de charge mobiles, est une suite de chocs avec les molécules du gaz. Entre deux chocs, l'électron est accéléré sous l'action de la force électrique. Les vitesses après le choc sont distribuées de manière aléatoire.

Le temps moyen τ_c de collision électron-molécule est de l'ordre de $\tau_c = 1 \times 10^{-12} \text{ s}$. L'énergie de première ionisation de la molécule d'oxygène vaut $W_{oxy} = 2,2 \times 10^{-18} \text{ J}$ et celle de l'azote $W_{azo} = 2,4 \times 10^{-18} \text{ J}$. Lorsque l'énergie cinétique d'un électron primaire acquise lors du mouvement dans le champ électrique atteint l'énergie de première ionisation d'une molécule, un effet d'avalanche se produit. Un électron primaire suffisamment énergétique peut éjecter un électron secondaire d'un atome.

1. Montrer que ce modèle permet de déterminer une valeur cohérente du champ disruptif en suivant la démarche suivante :

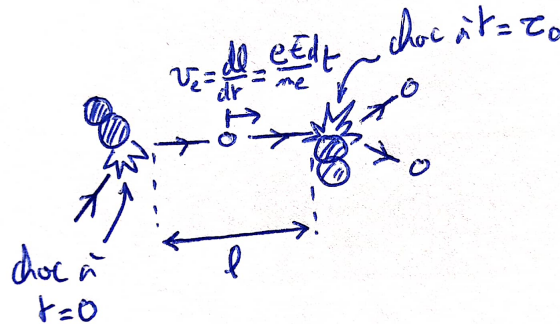
- écrire le PFD appliqué à un électron entre deux chocs.
- sachant qu'après un premier choc la vitesse de l'électron est nulle, déterminer sa vitesse juste avant un deuxième choc.
- comparer l'énergie cinétique de l'électron juste avant le deuxième choc à l'énergie d'ionisation pour obtenir la valeur du champ disruptif.



Un électron est accéléré entre deux chocs par le champ électrique d'après $m_e \vec{a} = -e \vec{E}$ donc sa vitesse avant collision est $\vec{v}_e = -\frac{e \tau_c}{m_e} \vec{E}$ soit une énergie cinétique de $E_c = \frac{1}{2} m_e v_e^2 = \frac{e^2 \tau_c^2}{2 m_e} E^2$.
 On atteint le champ disruptif pour $E_c = W$ donc $\frac{e^2 \tau_c^2}{2 m_e} E_d^2 = W$ donc $E_d = \frac{\sqrt{2 m_e W}}{e \tau_c} = 12 \text{ MV.m}^{-1}$

- Estimer le libre parcours moyen de l'électron défini comme la distance parcourue entre deux chocs successifs électron-molécule en intégrant l'expression de la vitesse obtenue précédemment.

En se référant à la première figure en fin d'énoncé, comparer le libre parcours moyen à la distance typique de variation du champ électrique et expliquer pourquoi l'hypothèse d'uniformité du champ électrique entre deux chocs est pertinente.



entre deux chocs $v_e = \frac{eE_d}{m_e} t$ donc $l = \int_0^{\tau_c} v_e dt = \frac{eE_d}{2m_e} \tau_c^2 = 1,32 \mu\text{m}$. Sur la figure le potentiel varie sur des distances de 0,1 mm, or $l \ll 0,1 \text{ mm}$ donc le champ peut-être considéré comme uniforme entre deux chocs.

Estimation de la tension inter électrodes nécessaire pour déclencher l'étincelle

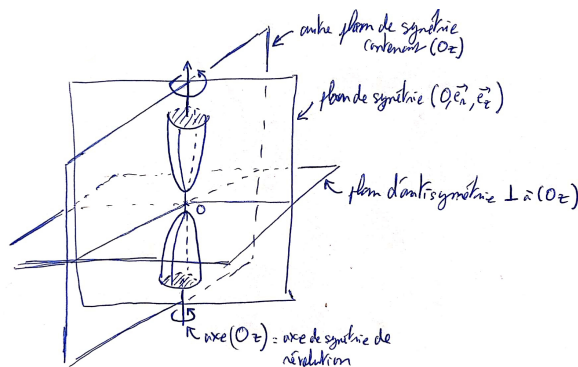
Les documents nécessaires pour aborder ces questions sont regroupés en fin d'énoncé.

Une étincelle peut se produire entre les électrodes s'il existe un chemin reliant ces conducteurs métalliques tel qu'en chaque point le champ électrique dépasse la valeur disruptive. Un logiciel de simulation est mis à profit pour dresser une carte de potentiel dans la zone des extrémités des électrodes, l'une étant portée au potentiel +1 V et l'autre au potentiel -1 V.

3. Préciser les plans de symétrie, d'anti-symétrie et invariances de la distribution de charges sur les électrodes.

Utiliser ces éléments de symétrie pour justifier que :

- on peut tracer une carte de champ et de potentiel uniquement dans le plan de la feuille
- on peut déduire de l'étude dans le plan de la feuille le champ dans tout l'espace
- le champ sur l'axe Oz est colinéaire à l'axe Oz
- le champ en $z=0$ est colinéaire à l'axe Oz



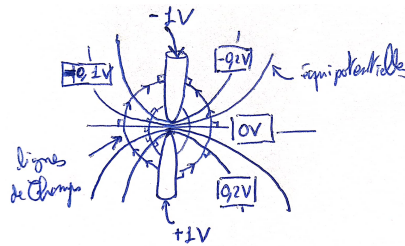
En coordonnées cylindriques le plan $(O, \vec{e}_r, \vec{e}_z)$ est un plan de symétrie donc \vec{E} appartient au plan donc les lignes de champs restent dans le plan de la feuille,

il y a invariance par rotation autour de (Oz) donc toutes les cartes de champs dans les plans (\vec{e}_r, \vec{e}_z) sont identiques,

pour $r = 0$ il y a une infinité de plan de symétrie (\vec{e}_r, \vec{e}_z) qui se croisent, d'où $\vec{E} // \vec{e}_z$.

Le plan entre les deux électrodes $z = 0$ est un plan d'anti-symétrie de \vec{E} et pour $z = 0$, $\vec{E} // \vec{e}_z$.

4. Compléter la carte de potentiel de la première figure en fin d'énoncé par un réseau de lignes de champs électriques. Préciser le sens du champ électrique, les signes des charges électriques déposées sur chaque électrode ainsi que les valeurs des potentiels des diverses équipotentielles tracées par le logiciel de simulation dans les cadres prévus à cet effet.



Les lignes de champ électrique sont perpendiculaires aux équipotentielle, et dirigées des potentiels élevés vers les potentiels faibles, soit ici en suivant les z croissant. L'électrode portée au potentiel positif porte des charges positives, et l'électrode de potentiel négatif des charges négatives.

Le saut de potentiel entre les équipotentielle est de 0,1 V et celle du milieu est à 0V donc valeurs encadrées de bas en haut sont 0,2 V puis 0 V puis -0,1 V puis -0,2 V.

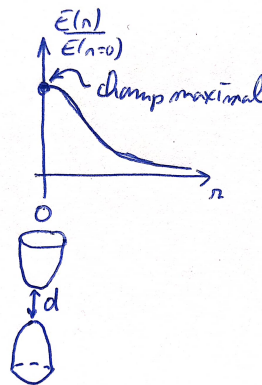
5. Le logiciel indique la valeur de la charge électrique q portée par une des électrodes $q = 6,2 \times 10^{-13}$ C. Que vaut la capacité du condensateur formé par les deux électrodes ? On s'aidera de la valeur de la tension.

$$C = \frac{q}{U} = 0,31 \text{ pF}$$

6. D'après le second graphe déterminer le chemin entre les deux électrodes qui présente le plus grand champ électrique.

Sachant que l'on peut approximer au premier ordre $u = \int \vec{E} \cdot d\vec{l} \approx E \cdot l$ avec l la longueur du chemin,

estimer la différence de potentiel minimale à imposer entre ces électrodes pour déclencher l'étincelle.

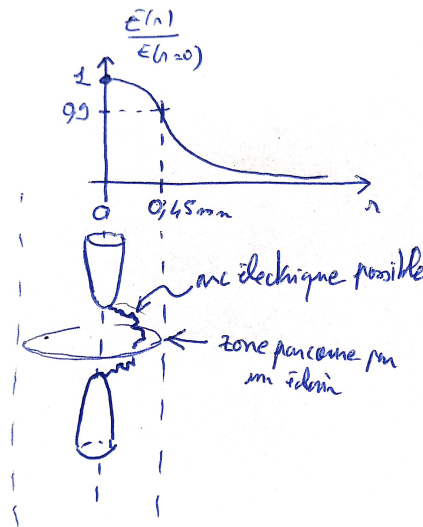


D'après les graphes le chemin comportant les plus fortes valeurs de champ sont pour $r = 0$. On a $E \sim \frac{U}{d}$ donc $U > E_d d \sim 14 \text{ kV}$

7. A partir de l'expression de l'énergie stockée dans un condensateur, indiquer la valeur de l'énergie stockée entre les électrodes lorsque l'étincelle se déclenche. Sous quelles formes cette énergie peut-elle se dissiper ?

$E = \frac{1}{2}CU^2 = 32 \mu\text{J}$, cette énergie est dissipée sous forme d'effet Joule, de rayonnement lumineux et d'émission sonore. Comme un éclair!

8. L'étincelle suit souvent un parcours légèrement chaotique entre les deux électrodes du fait d'inhomogénéités locales du plasma. Un critère empirique précise que la conduction par le gaz reste importante même si le champ électrique s'écarte de 10% de sa valeur disruptive. Estimer la largeur radiale de la zone parcourue par un courant en exploitant l'une des figures du document réponse.



D'après le dernier graphe $E(r) > 0,9E(r=0)$ pour $r < 0,45 \text{ mm}$, donc la zone parcourue à une largeur radiale de diamètre 0,90 mm

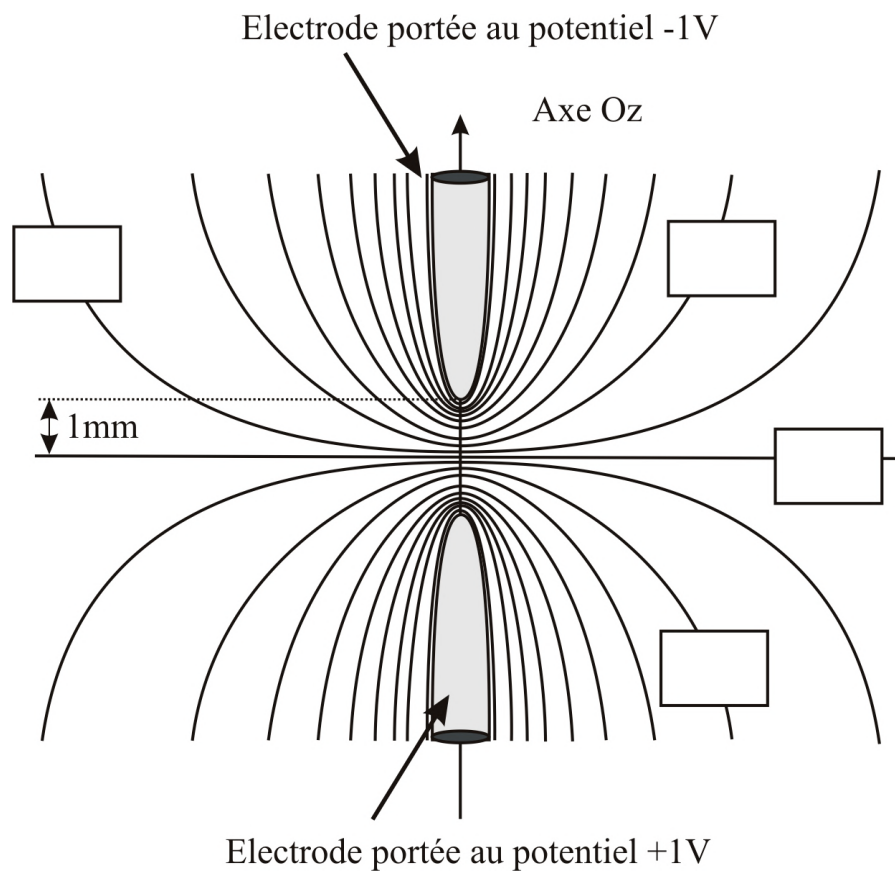


Figure Carte de potentiel au voisinage des électrodes obtenue par un logiciel de modélisation (le saut de potentiel d'une ligne équipotentielle à l'autre est de 100 mV)

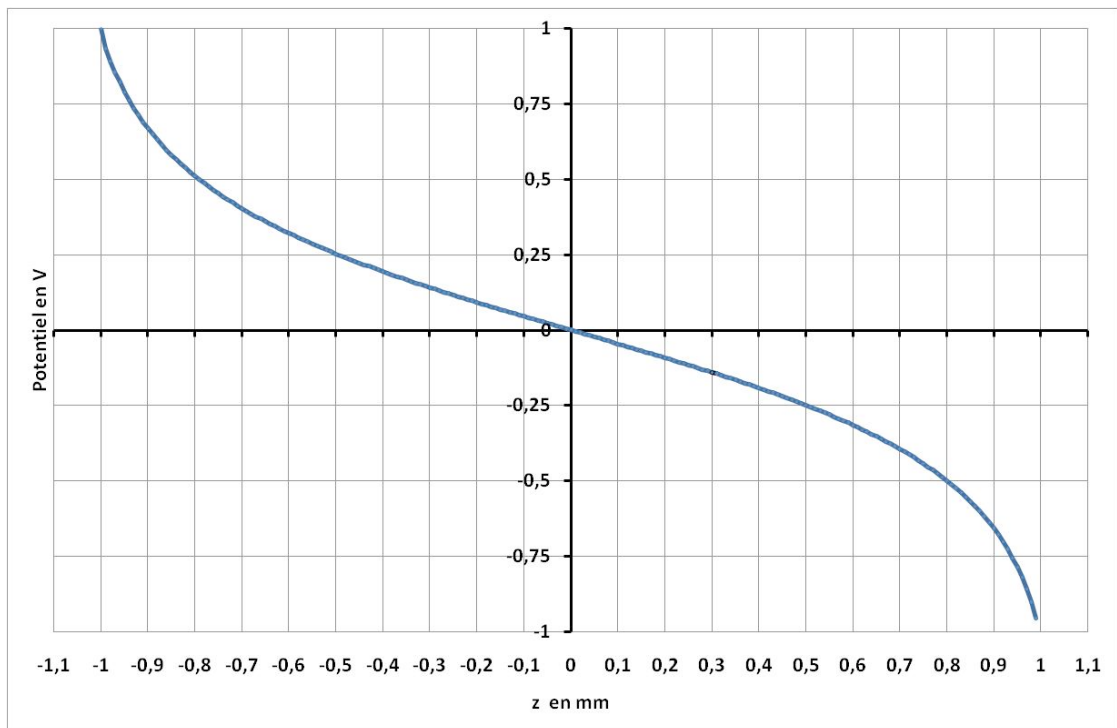


Figure Graphe du potentiel en fonction de la position sur l'axe (Oz) de révolution des électrodes

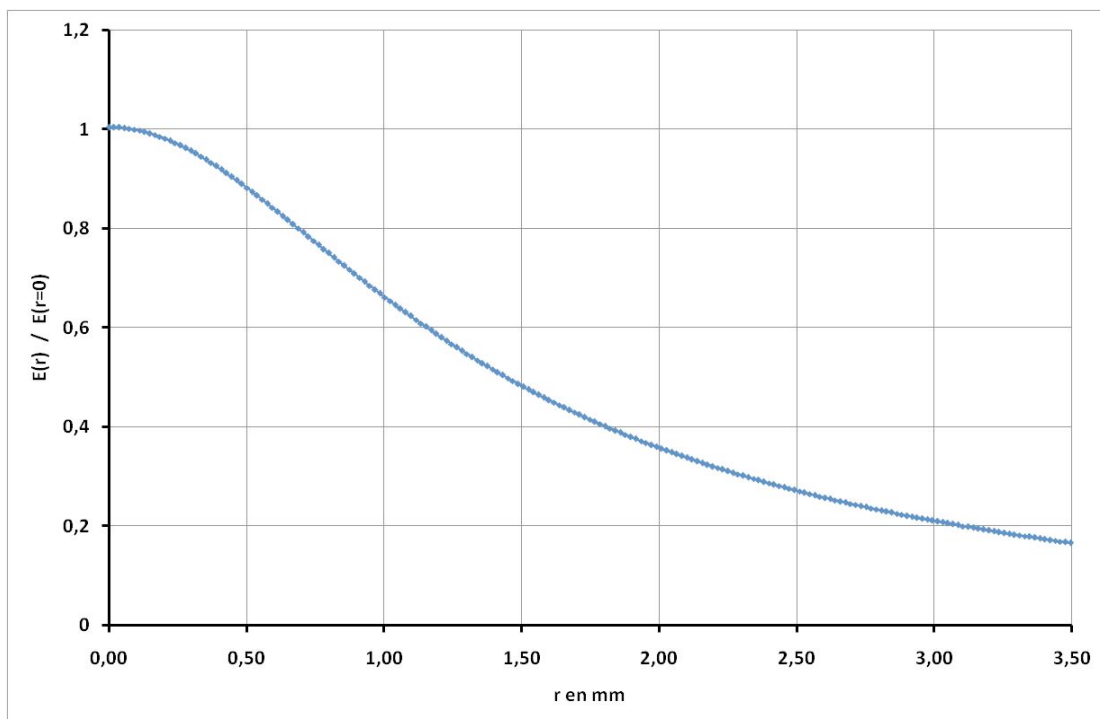


Figure Graphe de la norme du champ électrique en fonction de la distance à l'axe (Oz) dans le plan médiateur des électrodes