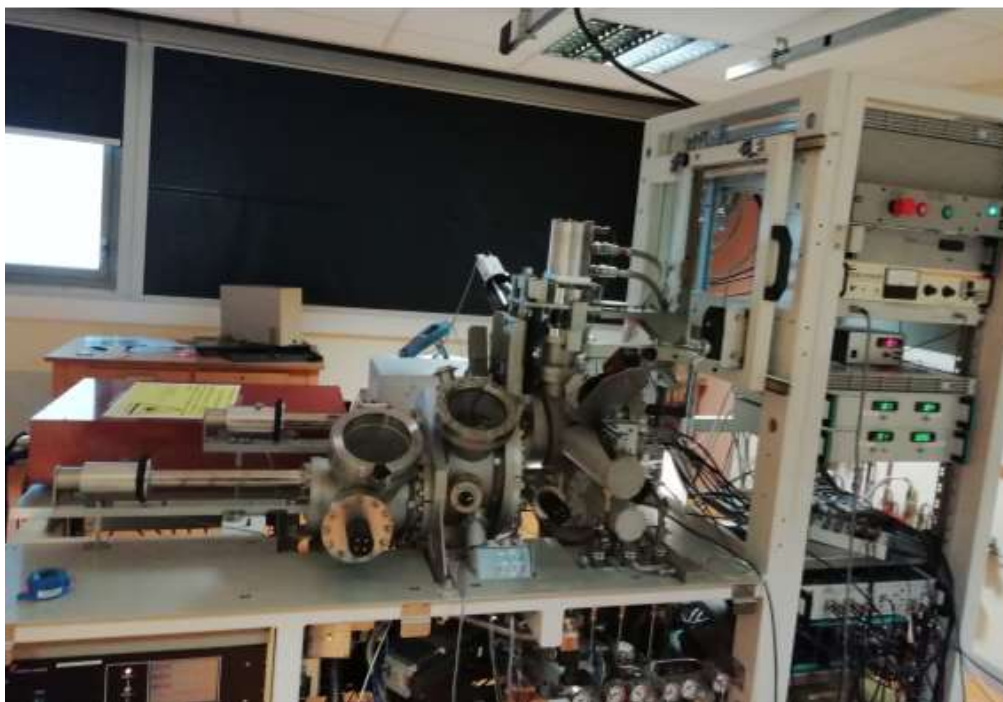


Sonde atomique : une histoire d'effet de pointe



Etudiants :
Thomas BOIGONTIER
Sarah BRAYOTEL
Louise OESTER

Enseignant-responsable du projet :
Remi DEMOULIN

Date de remise du rapport : **17/06/2019**

Référence du projet : **STPI/P6/2019 – 39**

Intitulé du projet : **Sonde atomique : une histoire d'effet de pointe**

Type de projet : **Bibliographie, expérimental, modélisation**

Objectifs du projet : Le but de ce projet était de fournir un rapport complet sur le fonctionnement de la sonde atomique, en le mettant en relation avec le phénomène d'effet de pointe. Le rapport devait contenir des traces de recherches bibliographiques et des comptes rendus d'expériences que nous devions mener tout au long du semestre. Ce dernier sera ensuite complété par un poster et une présentation orale qui auront pour but de résumer le travail fourni par l'ensemble des membres du projet.

Mots-clefs du projet : **Sonde atomique, effet de pointe, électrostatique**

TABLE DES MATIERES

1. Introduction	6
2. Méthodologie / Organisation du travail	6
3. Travail réalisé et résultats	8
3.1. Historique	8
3.2. Fonctionnement de la sonde atomique	9
3.3. Explication de l'effet de pointe	12
3.3.1. Phénomènes de base de l'électrostatique	12
3.3.2. Définition et applications de l'effet de pointe	14
3.3.3. Expériences réalisées et modélisations	15
3.4. Domaines d'application de la sonde atomique	25
4. Conclusions et perspectives	26
5. Bibliographie	27
6. Annexes	28
6.1. Programme réalisé	28

NOTATIONS, ACRONYMES

SAT : Sonde Atomique Tomographique

1. INTRODUCTION

Lors de ce travail le but était de réfléchir en groupe réduit sur un sujet choisi parmi une sélection. Le nôtre était centré sur l'étude de la sonde atomique et de son fonctionnement. Nous avons pour but de comprendre les mécanismes impliqués dans l'analyse de la structure d'échantillons donnés. Pour ce faire nous avons réalisé une étude expérimentale et bibliographique de l'effet de pointe, phénomène sur lequel repose le principe de la sonde atomique tomographique.

Afin d'être les plus complets possible dans notre approche, nous avons choisi dans un premier lieu de revenir l'évolution technologique de la sonde atomique au cours du temps. Nous avons détaillé ensuite son mode de fonctionnement point par point avant d'étudier les phénomènes principaux de l'électrostatique appliqués à notre sujet et de montrer leurs manifestations expérimentales. Finalement, notre projet s'achève sur un aperçu des applications de l'analyse par sonde atomique.

2. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Lors de la première séance de P6 nous avons commencé notre projet par une recherche bibliographique sur la sonde atomique tomographique afin de comprendre son fonctionnement et son application dans sa globalité. En effet nous étions complètement étrangers à ce dispositif au début du semestre.

Nous avons ensuite réfléchi à un moyen de mettre en évidence le phénomène d'effet de pointe afin de le mettre en relation avec la sonde.

Après avoir choisi le dispositif expérimental, nous avons alterné expériences, modélisations à l'aide du logiciel MatLab et recherches bibliographiques pendant nos heures de TD.

Le travail a généralement été réparti de manière à ce que toutes les personnes du groupe puissent travailler sur les expériences puis la modélisation, et pour finir effectuer des recherches bibliographiques. Le plus souvent nous étions à 2 ou seul sur chaque tâche afin d'être plus efficaces et nous alternions régulièrement.

En parallèle nous avons commencé le rapport chez nous, en y ajoutant les résultats d'expériences et les modélisations au fur et à mesure de l'avancement de notre projet.

C'est surtout lorsque nos expériences ont été terminées que nous avons pu nous consacrer totalement, en classe, chez nous ou en nous retrouvant à la bibliothèque à la rédaction de notre rapport final.

Bien que chacun ait travaillé sur l'ensemble des parties du rapport, voici comment nous nous sommes organisés :

Louise s'est principalement occupée des recherches et de la rédaction de l'histoire et l'évolution de la sonde atomique tomographique ainsi que des applications de la sonde atomique. Pour finir elle s'est aussi occupée de la mise en page.

Sarah s'est chargée de la partie concernant les phénomènes de base de l'électrostatique, l'explication de l'effet de pointe et aussi de la partie sur la modélisation numérique avec MatLab.

Enfin, Thomas a travaillé sur le fonctionnement de la sonde atomique tomographique et sur les expériences réalisées pour mettre en évidence l'effet de pointe et le relier à notre projet.

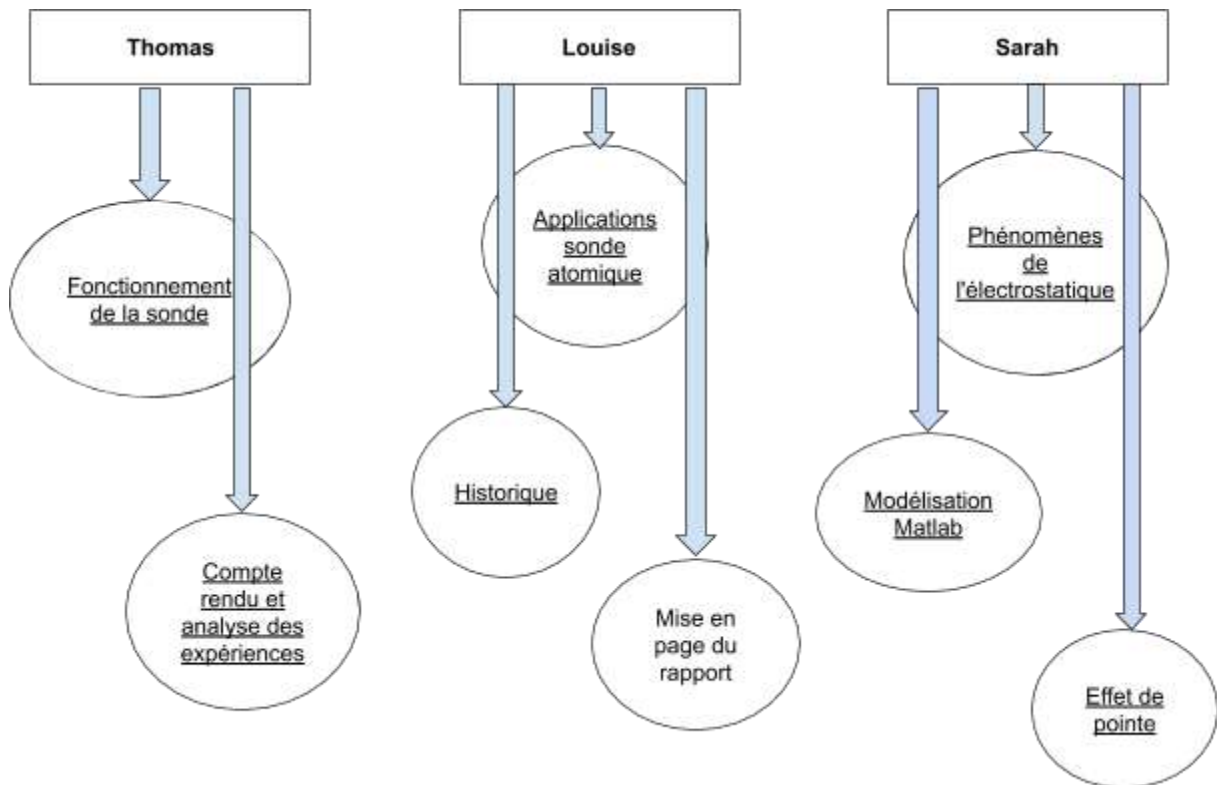


Figure 1 : Organigramme de la répartition du travail entre les différents membres du projet

3. TRAVAIL REALISE ET RESULTATS

3.1. Historique

Dès la fin du 19ème siècle, il avait été montré que les solides étaient de nature cristalline, sans toutefois que cette structure ne soit analysée plus en détails. En effet la nature cristalline des solides avait été seulement mise en évidence par diffraction des rayons X ou des électrons.

Ce n'est qu'en 1951 aux Etats-Unis, que Erwin Muller découvre le phénomène à l'origine de la sonde atomique avec la mise au point du microscope ionique à effet de champ, et ce, bien avant la découverte du principe du microscope électronique ou à celui à effet tunnel. Celui-ci réalise qu'il est possible de visualiser l'agencement des atomes à la surface d'alliages métalliques en projetant des atomes de gaz rares sur un écran phosphorescent. Cette répartition est alors visible sous forme d'images où les atomes sont représentés par des taches claires.

Avant d'analyser l'échantillon, celui-ci doit être formé en pointe très fine, ayant un rayon de courbure d'une centaine de nanomètre. On applique alors un potentiel électrique de plusieurs kilovolts à la pointe du matériel, ce qui permet de transformer les atomes de gaz en ions. Ces ions sont alors projetés sur un écran amplificateur, permettant ainsi d'avoir une image agrandie de la surface de l'échantillon. A cette époque, s'il est possible de visualiser la position des atomes, il est en revanche impossible de déterminer leur nature.

En 1969 on réalise qu'il est possible de déterminer la composition des atomes si l'on augmente le potentiel électrique au sein d'un microscope atomique. En effet, les atomes se détachent et volent sous l'effet du champ électrique, et il devient alors possible de mesurer leur vitesse de déplacement. Celle-ci permet alors de les caractériser et de les différencier entre eux. On peut donc en déduire leur nature. La première sonde atomique voit alors le jour. Si la méthode est bonne, la réalisation n'est pas encore optimale puisqu'il est très difficile d'accéder à l'ultravide. L'utilisation de cet instrument est alors limitée uniquement aux matériaux métalliques. De plus, les sondes ne permettent pas encore d'obtenir des images indiquant avec précision la position des atomes, elles ne donnent que des profils de concentrations.

L'utilisation de la sonde atomique par les laboratoires de recherches devient plus fréquente à partir du début des années 80, elle est alors utilisée notamment dans les domaines de l'aéronautique et du nucléaire civil.

En 1988 une sonde anglaise dotée d'un détecteur sensible à la position est créée. Celle-ci peut alors repérer les atomes avec précision et restituer leur position sous forme d'images en 3 dimensions. L'idée est approfondie par un laboratoire rouennais

(GPM) qui met au point en 1994 la sonde atomique tomographique. Elle sera commercialisée par CAMECA à la fin des années 90.

Enfin, en 2004 l'utilisation de laser ayant une pulsation de quelques femtosecondes permet de contrôler l'évaporation des atomes et d'en analyser un plus grand nombre. L'utilisation d'une impulsion laser ultra brève rend également possible l'analyse de nouveaux matériaux, non métalliques, tels que les semi-conducteurs et les isolants. La technologie laser permet également d'explorer un plus grand volume au sein des matériaux et donc de disposer de plus d'informations. En effet, les lasers sont plus adaptés à l'analyse de matériaux fragiles et permettent d'étudier des échantillons pendant une durée plus importante avant que la pointe ne se fracture. Or, durant les analyses par sonde, c'est souvent la cassure de la pointe qui est à l'origine de la fin des mesures, avec pour cause, une pression électrostatique trop importante. De plus la réduction de la durée des impulsions permet de réduire l'augmentation de la température de l'échantillon liée à l'utilisation du laser. Ainsi, cela évite que les atomes ne se diffusent en surface, ce qui nuirait à la résolution des images obtenues. Suite à ces améliorations l'utilisation de la sonde atomique est étendue à de nouveaux domaines comme la géologie ou la biologie.

3.2. Fonctionnement de la sonde atomique

La sonde atomique tomographique est un microscope analytique en 3 dimensions permettant d'observer la répartition des atomes qui constituent un matériau en connaissant sa nature chimique. Pour ce faire, l'appareil évapore les atomes de l'échantillon à étudier en appliquant un champ électrique intense ou en dirigeant un laser sur un matériau taillé en une pointe très fine (20 à 100 nm de rayon de courbure). En effet, l'énergie apportée est assez importante pour briser les liaisons interatomiques et détacher les atomes du matériau. En revanche elle ne doit pas être trop importante pour ne pas ioniser une trop grande partie du matériau à chaque impulsion. Elle doit seulement détacher un atome ou quelques-uns afin que l'on puisse analyser leur temps de vol et les détecter efficacement sur l'écran placé en face de la pointe. Cet écran va analyser leur position en 2 dimensions et, en prenant en compte le temps de vol et en connaissant les trajectoires des ions, l'ordinateur va pouvoir reconstituer le matériau couche atomique par couche atomique.

Cette méthode de détection des ions utilisée est appelée spectrométrie de masse à temps de vol. En effet ce sont les cations les plus légers qui arriveront en premier sur l'écran. Ce dernier va déterminer l'énergie cinétique de l'ion considéré et, par résolution de l'équation de conservation de l'énergie et en connaissant le temps de vol, on va pouvoir retrouver le rapport masse sur charge de l'ion et ainsi identifier sa nature chimique.

On obtiendra donc un modèle 3D par ordinateur du matériau considéré.

La sonde atomique tomographique se décompose en :

- Un système qui crée un vide partiel en maintenant la pression du volume considéré entre 10^{-8} et 10^{-10} Pa, ou le libre parcours moyen d'une molécule est d'environ 40 km. Les molécules auront donc le temps d'entrer en collision plusieurs fois avec les parois de la cuve avant de se rencontrer.
- Un système permettant de manipuler et d'observer les échantillons à l'intérieur de l'ultra-vide.
- Un système de refroidissement afin de limiter l'agitation thermique des molécules en atteignant des températures descendant jusqu'à 15K.
- Un générateur de haute tension pour appliquer une tension continue juste en dessous de la tension d'évaporation du matériau.
- Un système permettant d'envoyer des impulsions électriques périodiques au matériau afin d'évaporer un atome de la pointe.
- Une électrode négative à laquelle est souvent appliquée une tension négative.
- Un écran de détection des ions.

Les différentes parties sont reliées à un système informatique qui va reconstituer le matériau en 3D avec les données délivrées par les instruments de mesure.

Pour certains matériaux, on va utiliser un laser pour envoyer les impulsions d'énergie pour décrocher les atomes plutôt qu'un système électrique. En revanche l'impulsion doit être extrêmement brève car cet apport d'énergie peut entraîner un échauffement du matériau et ainsi décrocher plus d'atomes que prévu, ce qui rendrait les mesures impossibles. Evidemment les matériaux conducteurs comme les métaux vont être plus faciles à analyser que les semi-conducteurs ou les isolants puisqu'il sera plus simple de leur appliquer une très haute tension si on utilise pas le laser.

Pour évaporer les atomes en surface de la pointe, il faut apporter assez d'énergie pour les arracher et les ioniser positivement une fois. Cette énergie Q_0 est donc égale à la somme de l'énergie de sublimation Λ et de l'énergie de première ionisation de l'atome I_0 . En ionisant un atome, un électron est transmis à l'échantillon et donc l'énergie totale à fournir est diminuée par le travail de l'électron Φ sur la surface de l'échantillon. Ainsi on obtient :

$$Q_0 = \Lambda + I_0 - \Phi \quad (1)$$

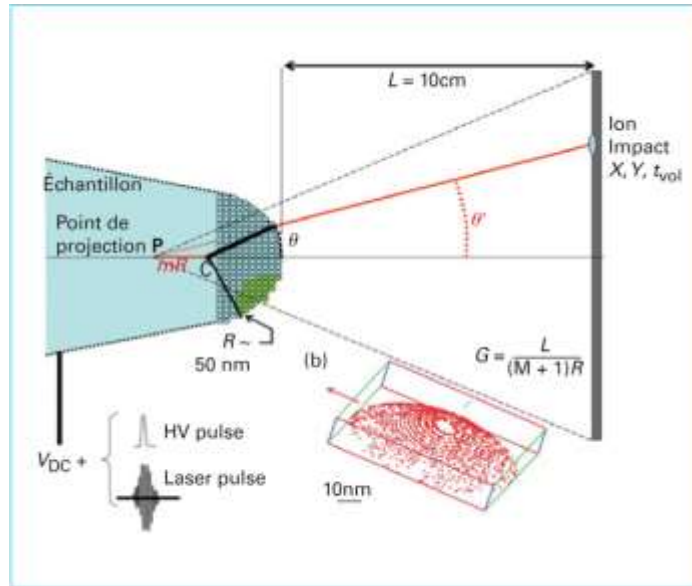


Figure 2 : Schéma montrant l'ionisation des atomes d'un échantillon par SAT à pulse laser

En ce qui concerne l'identification des atomes qui arrivent sur l'écran, l'analyse est effectuée par spectrométrie de masse à temps de vol. La mesure des temps de vol des espèces chimiques depuis l'échantillon jusqu'à un détecteur situé à une distance L permet de déterminer leur vitesse et d'accéder directement à leur rapport masse sur charge (m/n). Ce rapport m/n des ions (avec n le nombre de charges positives du cation formé) s'exprime à partir de la conservation de l'énergie :

$$W_c = ne \times (V_0 + V_p) = \frac{1}{2} m \times \left(\frac{L}{t}\right)^2 \quad (2)$$

Et en arrangeant l'équation on fait apparaître le rapport masse sur charge :

$$\frac{m}{n} = 2e \times (V_0 + V_p) \times \left(\frac{t}{L}\right)^2 \quad (3)$$

- Avec :
- W_c l'énergie cinétique
 - n le nombre de charges positives
 - e la charge élémentaire
 - V_0 la tension continue appliquée à la pointe
 - V_p l'amplitude de haute tension superposée à V_0
 - m la masse de l'ion mesurée par temps de vol
 - L la distance pointe/écran
 - t le temps de vol de l'ion

Pour donner un ordre d'idée, le temps de vol pour une distance L de 10 cm est de l'ordre d'une fraction de μs .

On effectue ensuite une spectrométrie de masse avec en abscisse le rapport masse sur charge et en ordonnée le nombre d'ions.

Un algorithme prenant en compte la position en (X,Y) d'impact de chaque ion sur l'écran, leur angle d'émission et la nature chimique de chacun (grâce à la spectrométrie de masse à temps de vol) va reconstruire le matériau analysé couche atomique par couche atomique.

En pratique, l'algorithme de reconstruction fonctionne selon les équations suivantes :

$$\left. \begin{aligned} X &= R \sin \theta \cos \theta \\ Y &= R \sin \theta \sin \theta \\ Z &= R(1 - \cos \theta) \end{aligned} \right\} (4)$$

L'angle θ est obtenu par l'angle d'émission θ' :

$$\theta = \theta' + \sin \theta' (m \sin \theta') \quad (5)$$

Lui-même déduit des coordonnées de l'impact de l'ion sur le détecteur :

$$\theta' = \arctan \left(\sqrt{\frac{x^2 + y^2}{L}} \right) \quad (6)$$

Bien sûr ici, on ne prend pas en compte les incertitudes de mesures ou encore les autres phénomènes complexes causant des problèmes dans la reconstruction du matériau.

3.3. Explication de l'effet de pointe

3.3.1. Phénomènes de base de l'électrostatique

Le champ électrostatique \vec{E} créé en un point M par une charge ponctuelle q_1 est donné par $\frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r^2}$ où r est la distance entre q_1 et M, et ϵ_0 est la permittivité du vide. Il est défini en tout point de l'espace et doit sa présence aux interactions entre les matières chargées.

Ce champ est caractérisé par plusieurs propriétés fondamentales.

Tout d'abord il diverge depuis les charges positives et converge vers les charges négatives.

$div(\vec{E})$ est la divergence de \vec{E} , en coordonnées cartésiennes $\vec{E} = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z}$

On obtient alors l'équation de Maxwell-Gauss : $\vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$

En coordonnées cartésiennes, on définit le gradient d'un champ g par

$$\overrightarrow{\text{grad}}g = \frac{\partial g}{\partial x}(x, y, z)\overrightarrow{U}_x + \frac{\partial g}{\partial y}(x, y, z)\overrightarrow{U}_y + \frac{\partial g}{\partial z}(x, y, z)\overrightarrow{U}_z$$

Soit V le potentiel électrostatique d'une charge ponctuelle tel que $V = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}$

De plus $\vec{E}(M) = -\overrightarrow{\text{grad}}V(M)$

Les équipotentielles sont perpendiculaires aux lignes de champ électrostatique et ont chacune une valeur de potentiel constante. Le champ \vec{E} est dirigé dans le sens des potentiels décroissants.

On utilise l'opérateur Δ , nommé Laplacien scalaire, et pour tout champ scalaire g , par définition, $\Delta g = \overrightarrow{\text{grad}} \overrightarrow{\text{grad}} g$

En coordonnées cartésiennes $\Delta g = \frac{\partial^2 g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 g}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 g}{\partial z^2}$

Le potentiel vérifie l'équation de Poisson d'où $\Delta V = -\frac{\rho}{\epsilon_0}$

Où ρ est la densité volumique de charge exprimée en C.m^{-3} .

Dans une zone vide de charge $\rho = 0$, on aboutit alors à l'équation de Laplace : $\Delta V = 0$

Au voisinage d'un conducteur, la valeur du champ électrostatique \vec{E} est plus importante là où la courbure du matériau dans l'espace est la plus forte, puisque la densité volumique de charges est plus grande. En effet, d'après l'équation de Maxwell Gauss, ce champ est proportionnel à la densité volumique de charges. De plus, ce dernier dérive aussi du potentiel ce qui explique qu'un fort potentiel appliqué à une pointe va créer un champ électrostatique intense à son extrémité, là où la courbure est la plus forte. C'est ainsi que fonctionne l'effet de pointe.

Par ailleurs on peut montrer directement qu'à la surface d'une sphère conductrice, le champ électrostatique prend la valeur $E = \frac{V}{R}$, où V est le potentiel à la surface de la sphère et R son rayon. On assimile alors la pointe à une sphère conductrice à fort rayon de courbure.

Observation du champ électrique à l'œil nu

Il est possible d'observer le champ électrostatique de manière macroscopique en procédant de manière expérimentale. On utilise pour ce faire un condensateur, dans lequel on place un liquide et des grains. Une fois le condensateur mis en marche, les grains se déplacent pour s'orienter selon la direction du champ électrostatique. L'assemblage des grains restitue alors la forme des lignes de champs.

Ci-dessous, l'expérience a été réalisée en utilisant de la paraffine et de l'eau au sein d'un condensateur plan :

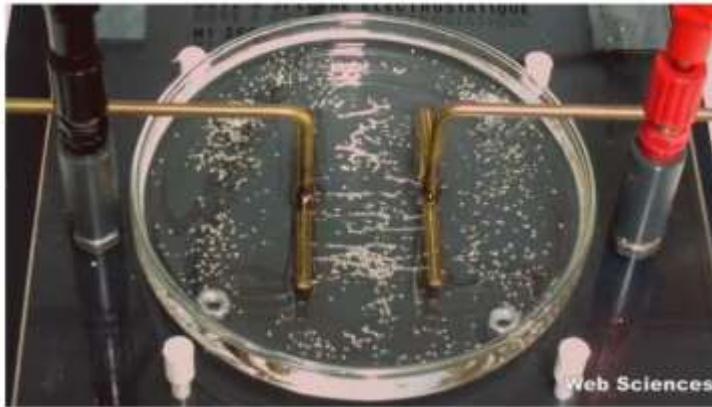


Figure 3 : photo d'une expérience visant à mettre en évidence les lignes de champ électrostatique

3.3.2. Définition et applications de l'effet de pointe

L'effet de pointe est un phénomène qui se concrétise par la création d'un champ électrique particulièrement élevé au niveau de la pointe d'un matériau chargé.

Prenons par exemple une boule faite d'un matériau conducteur. Les charges qui se répartissent uniformément à sa surface se repoussent entre elles. Si une pointe est créée à la surface de cette boule, les charges qui y sont situées seront plus éloignées des autres charges, et seront donc moins repoussées. Ainsi, sur une surface présentant une pointe, les charges auront tendance à être plus présentes au niveau de la pointe, ce qui explique que le champ électrique y soit particulièrement élevé.

Maintenant, si l'on forme un creux au niveau d'une boule, l'effet inverse va être observé. Les charges qui s'y trouvent seront plus repoussées que les autres, elles seront donc présentes en moins grand nombre. En conséquence le creux sera moins chargé que le reste de la surface.

L'effet de pointe est d'autant plus élevé que la pointe d'un conducteur sera fine ou que le rayon de courbure d'une boule sera faible.

L'une des applications de l'effet de pointe la plus connue est le paratonnerre.

Le paratonnerre est constitué de deux parties : une, ou plusieurs, tige placée en hauteur qui a pour but d'intercepter les éclairs susceptibles d'éclater à proximité, et des câbles, aussi appelés conducteurs de descentes, qui acheminent les charges de la pointe jusqu'au sol évitant ainsi que celles-ci n'impactent l'immeuble sur lequel la pointe est située. En effet pendant une période orageuse, le champ électrostatique sera le plus élevé en haut de la pointe et ainsi l'arc électrique sera amené à se former sur la pointe puisque celui-ci cherche toujours à frapper dans les milieux les moins résistifs.

3.3.3. Expériences réalisées et modélisations

Nous avons réalisé plusieurs expériences afin de montrer le comportement du champ électrique autour d'une pointe.

Dans une cuve graduée remplie de sulfate de cuivre, nous avons placé deux électrodes de cuivre auxquelles nous avons appliqué un potentiel de 0,45V pour l'une et de 0V pour l'autre, et nous avons mesuré le potentiel en chaque point de la cuve à l'aide d'une sonde reliée à un voltmètre.

Ne disposant que d'une tension d'entrée de 5V, nous avons réalisé un pont diviseur de tension afin d'obtenir une tension de sortie de 0,45V avec deux résistances de 10k ohms et de 1k ohms montées en série.

$$V_s = V_e \cdot R_2 / (R_1 + R_2) = 5 / 11 = 0,45V \quad (7)$$

Voici un schéma du montage réalisé nous avons repris le schéma mis en œuvre lors du TP de P5 du semestre dernier :

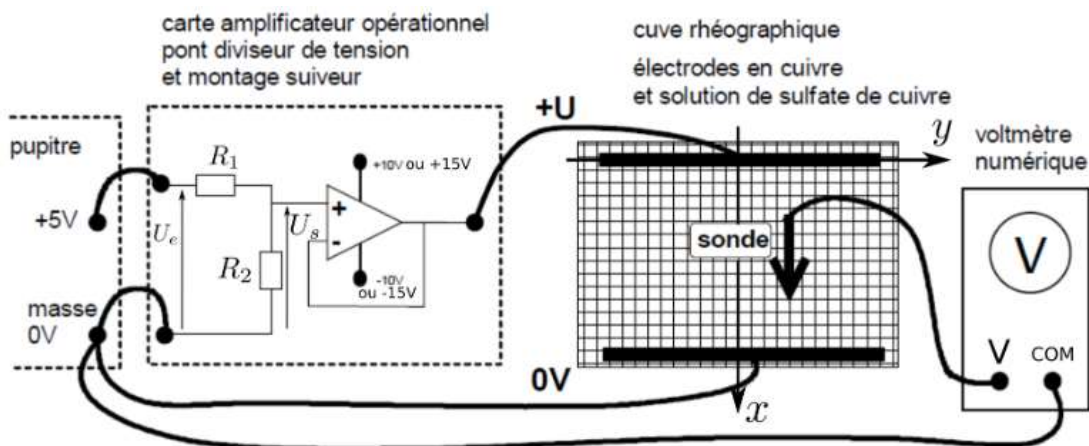


Figure 4 : Schéma du dispositif expérimental adopté pendant les séances de projet

Les valeurs obtenues nous ont permis de tracer les équipotentiels à l'aide d'un tableur et ainsi de visualiser les lignes de champ.

Nous avons effectué les expériences suivantes :

- Condensateur plan

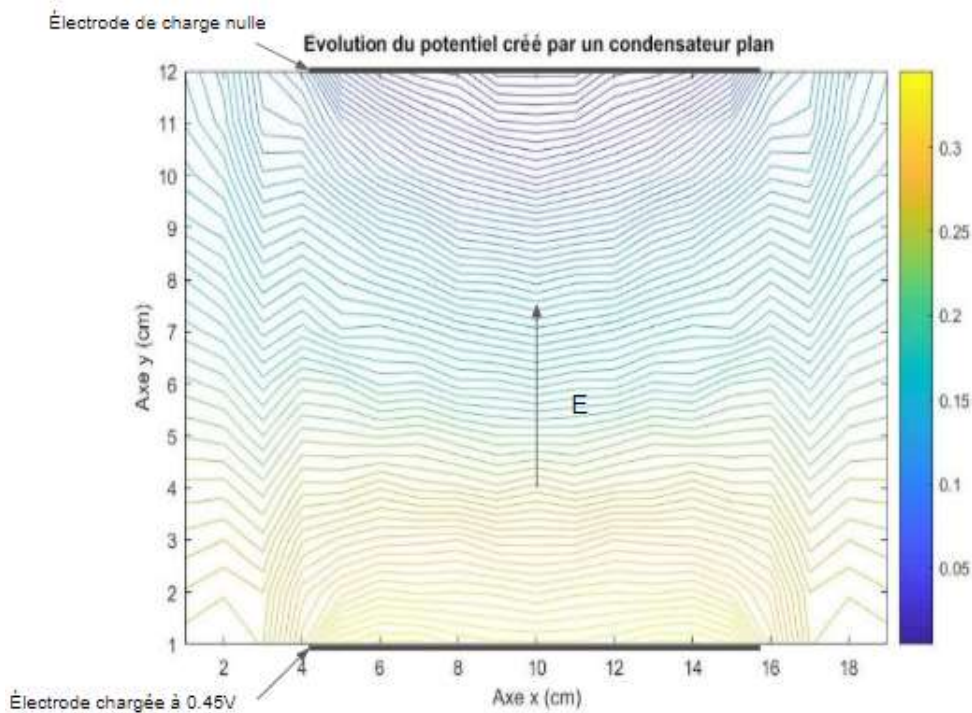


Figure 5 : Courbes représentant les variations expérimentales du potentiel de cadre d'un condensateur plan

Le condensateur plan est l'expérience de référence car nous connaissons le comportement du champ électrique dans un condensateur, et donc nous pouvons en déduire les équipotentiels. Ainsi grâce à ces résultats nous avons vérifié que le montage réalisé fonctionnait correctement, car les équipotentiels obtenues sont approximativement parallèles aux deux électrodes et elles décroissent depuis l'électrode de potentiel 0,45 V vers l'électrode de potentiel 0V. En revanche on remarque un profil d'équipotentiels différent dès que l'on se place entre les côtés des électrodes (en $x = 4$ et $x = 16$) et les parois de la cuve (en $x = 0$ et $x = 20$). Cette différence est due aux effets de bords. Habituellement on les néglige puisqu'on considère que les électrodes ont une taille très grande comparée à la distance qui les sépare, mais ici ce n'est pas le cas. En effet les électrodes sont approximativement éloignées d'une distance égale à leur taille en cm, ce qui était plus adapté à notre méthode de mesure. Si nous avions pris une distance très petite entre les électrodes, nous n'aurions pas pu avoir des résultats précis à cause de la taille de notre sonde et de la précision liée à la position de la sonde dans la cuve.

- 2 sources ponctuelles

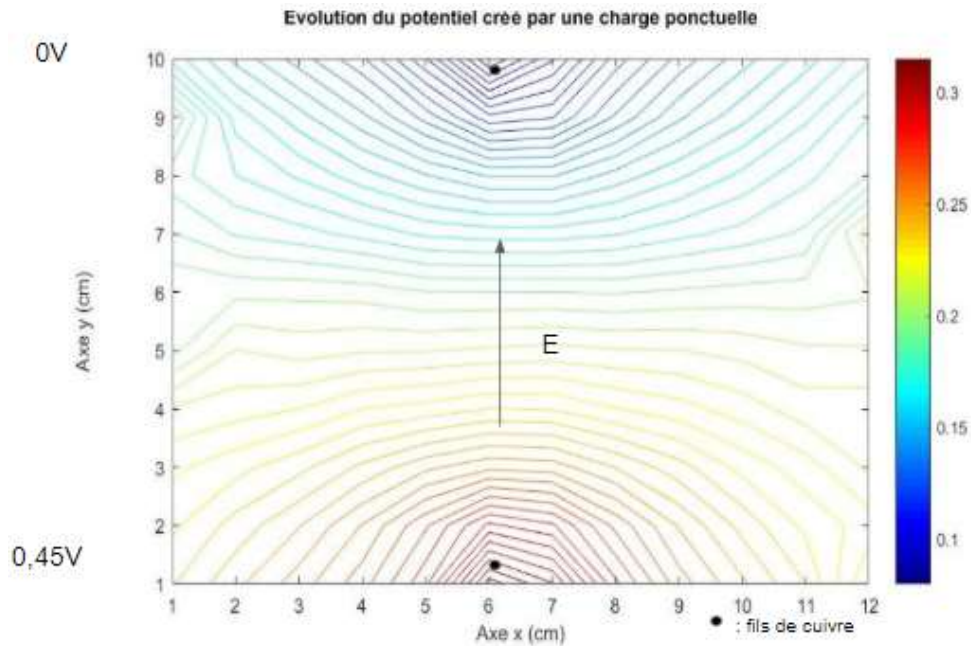


Figure 6 : Courbes représentant les variations expérimentales du potentiel de cadre de deux sources ponctuelles

Cette expérience nous a permis d'observer les équipotentiels pour deux électrodes non planes. Elles forment des cercles concentriques autour de chaque électrode. On remarque aussi que si on reste à la position entre $x = 6$ et $x = 7$, les lignes de champ électrostatique sont toujours dirigées selon l'axe y . De plus, lorsqu'on se rapproche du milieu de la cuve, les équipotentiels sont horizontales et parallèles comme lors de l'expérience précédente.

Pour chacune des 4 expériences suivantes, nous avons utilisé une électrode plane de potentiel 0V et une seconde électrode, de potentiel 0.45V, s'apparentant à une pointe afin d'essayer de mettre en évidence le phénomène d'effet de pointe.

- Pointe avec un fil de cuivre / électrode plan

Afin de symboliser une pointe, nous avons placé un fil de cuivre perpendiculairement à l'électrode plane. Même si à son extrémité le rayon de courbure n'est pas assez petit pour obtenir un effet de pointe conséquent, nous avons observé que les équipotentiels sont plus resserrées autour du fil de cuivre, de plus, lorsqu'elles sont proches de l'électrode plane elles lui sont perpendiculaires.

- Petite pointe en 2D / électrode plan

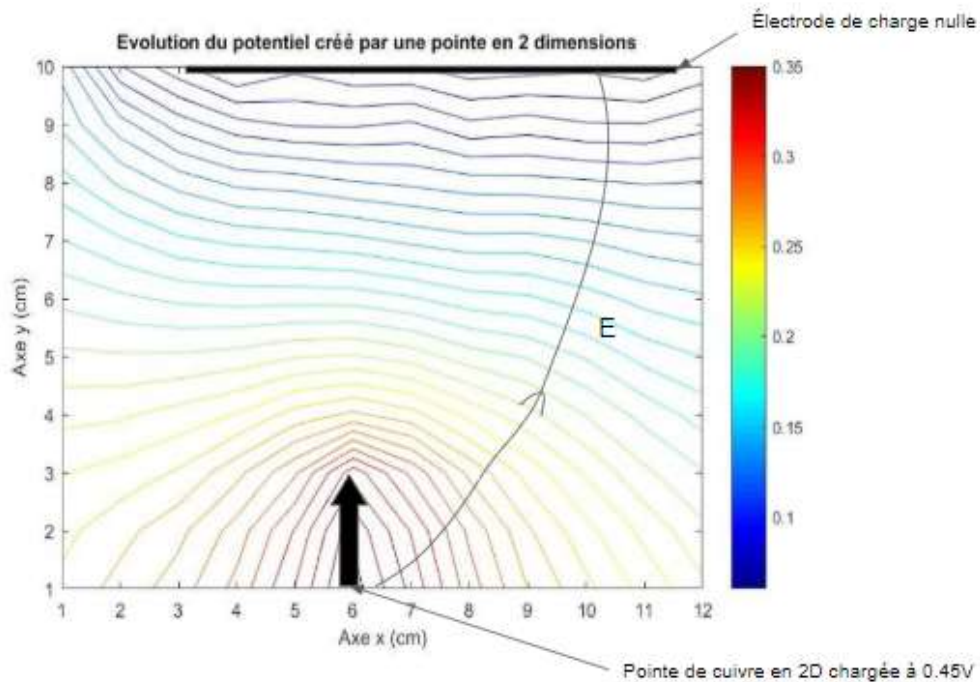


Figure 7 : Courbes représentant les variations expérimentales du potentiel d'une électrode plane et d'une pointe en 2D

La pointe en 2D de cette expérience a été découpée dans une fine plaque de cuivre, ainsi nous n'avons pas pu obtenir de réel effet de pointe car celle-ci s'apparente plus à une surface qu'un volume chargé. Il n'y a donc pas de rayon de courbure au bout de la pointe à proprement parler. Au bout de la pointe, on observe que les équipotentielles forment des arcs de cercle plus resserrés, et proche de l'électrode plane elles lui sont encore une fois parallèles. On observe aussi que le profil des équipotentielles n'est pas tout à fait le même à gauche qu'à droite. Cela est dû au fait que la pointe n'est pas parfaitement symétrique et que l'électrode plane n'est pas très bien centrée.

- Pointe avec plaque de cuivre / électrode plan

Pour cette expérience, nous avons plié une électrode plane de cuivre en deux afin de créer une sorte de pointe au niveau du pli.

La représentation des équipotentielles est très similaire à celle obtenue dans l'expérience précédente. De même l'effet de pointe est très réduit car même si la pointe est en 3D elle est creuse, ce qui limite considérablement le phénomène.

- Pointe pleine / électrode plan

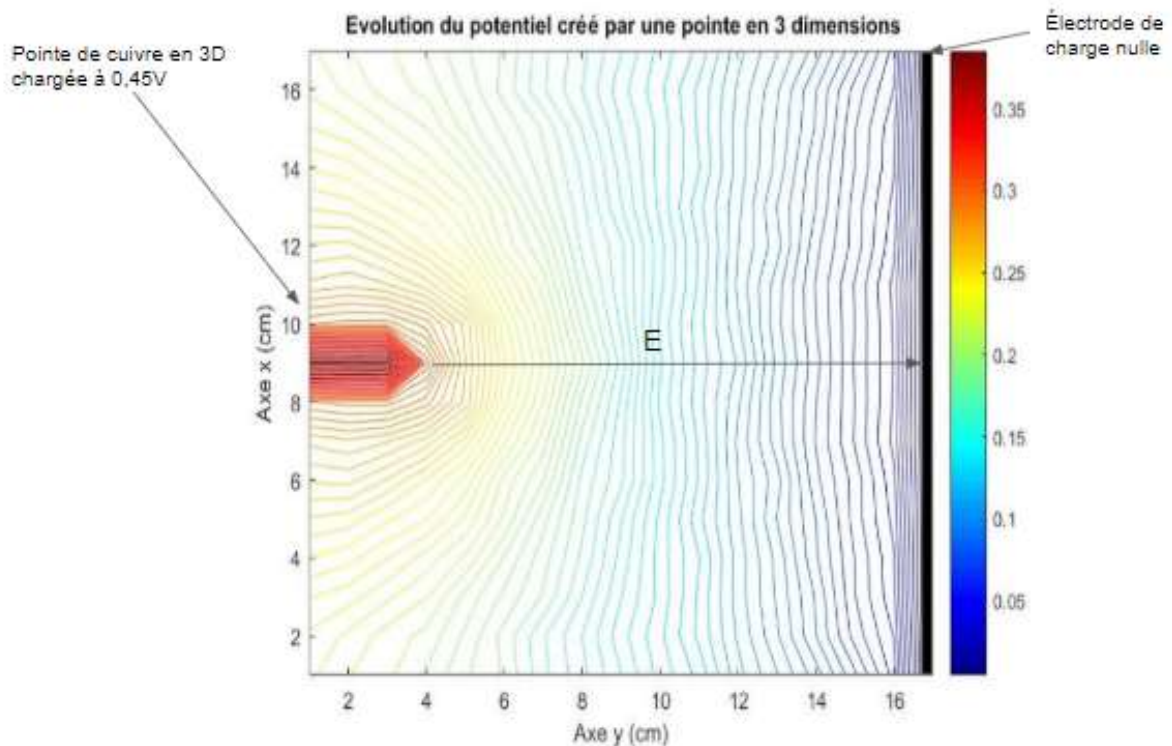


Figure 8 : Courbes représentant les variations expérimentales du potentiel de cadre d'une électrode plane et d'une pointe en 3D

Cette fois-ci, la pointe de cuivre utilisée est pleine mais son rayon de courbure n'est pas assez petit pour observer un effet de pointe conséquent.

En effet on n'observe pas de potentiel plus important au bout de la pointe mais on remarque que les équipotentiels sont un peu plus resserrées dans la zone correspondante. Or on sait que $\vec{E} = -\overrightarrow{grad}(V)$, et si les équipotentiels sont plus resserrées, cela implique que le gradient du potentiel est plus grand et donc que le champ électrostatique est plus important dans cette zone. Il y a donc un léger effet de pointe bien qu'il ne soit pas vraiment significatif.

Le potentiel appliqué dans ces expériences n'est pas assez élevé pour pouvoir observer un réel effet de pointe, mais elles nous permettent de comprendre la trajectoire du champ électrique grâce aux équipotentiels, et donc la trajectoire des atomes arrachés par effet de pointe.

Modélisations numériques effectuées avec le logiciel MatLab

Pour modéliser les équipotentielles, nous avons utilisé une équation donnant le potentiel en tout point (x,y) de la modélisation. Cette équation est obtenue par une équation de poisson et les principes de l'électrostatique :

$$\left. \begin{aligned} \vec{E}(M) &= -\overrightarrow{\text{grad}}V(M) \\ \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ -\text{div}\overrightarrow{\text{grad}}V &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \Delta V &= -\frac{\rho}{\epsilon_0} \end{aligned} \right\} (8)$$

Or dans une zone vide de charge $\rho = 0$ donc $\Delta V = 0$. (9)

Par un développement de Taylor on obtient :

$$\begin{aligned} V(x + \delta, y) &= V(x, y) + \delta V'(x, y) + \frac{\delta^2}{2} V''(x, y) \\ V(x - \delta, y) &= V(x, y) - \delta V'(x, y) + \frac{\delta^2}{2} V''(x, y) \\ V(x + \delta, y) + V(x - \delta, y) &= 2 * V(x, y) + \delta^2 V''(x, y) \\ V''(x, y) &= \frac{\partial^2 V}{\partial^2 x} = \frac{1}{\delta^2} (V(x + \delta, y) + V(x - \delta, y) - 2 * V(x, y)) \\ \frac{\partial^2 V}{\partial^2 y} &= \frac{1}{\delta^2} (V(x, y + \delta) + V(x, y - \delta) - 2 * V(x, y)) \\ \Delta V &= \frac{\partial^2 V}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 V}{\partial^2 y} \\ 4 * V(x, y) &= V(x + \delta, y) + V(x - \delta, y) + V(x, y + \delta) + V(x, y - \delta) \\ V(x, y) &= \frac{1}{4} (V(x + \delta, y) + V(x - \delta, y) + V(x, y + \delta) + V(x, y - \delta)) \end{aligned} \quad (10)$$

La modélisation numérique à l'aide du logiciel Matlab a permis de montrer plus clairement le phénomène d'effet de pointe mais aussi de valider le modèle utilisé lors de nos expériences avec la cuve. En effet on observe les mêmes profils d'équipotentielles et de lignes de champ mais avec un effet de pointe plus marqué. Nous avons donc simulé des expériences similaires à nos expériences avec la cuve de sulfate de cuivre :

- Condensateur plan

L'une des électrodes a un potentiel de +100V et l'autre de -100 V, ainsi comme la différence de potentiel entre les 2 électrodes est élevée, on remarque facilement que les équipotentielles sont plus resserrées lorsqu'elles sont proches des électrodes, de plus ces équipotentielles sont parallèles aux électrodes. Les cartes de potentiel obtenues expérimentalement et sur Matlab sont similaires, ce qui montre que le modèle expérimental utilisé est juste et que l'on peut exploiter les graphiques obtenus pour les autres expériences.

On remarque des effets de bords aux extrémités de la modélisation Matlab, cependant les électrodes peuvent être considérées comme infinies car leur taille est 5 fois supérieure à la distance séparant les électrodes, ce qui permet normalement de négliger les effets de bord. Ceux-ci sont dus à la condition initiale que tous les bords du modèle ont un potentiel de 0V.

Pour chacune des modélisations numériques suivantes, on observe des effets de bords dus aux conditions initiales.

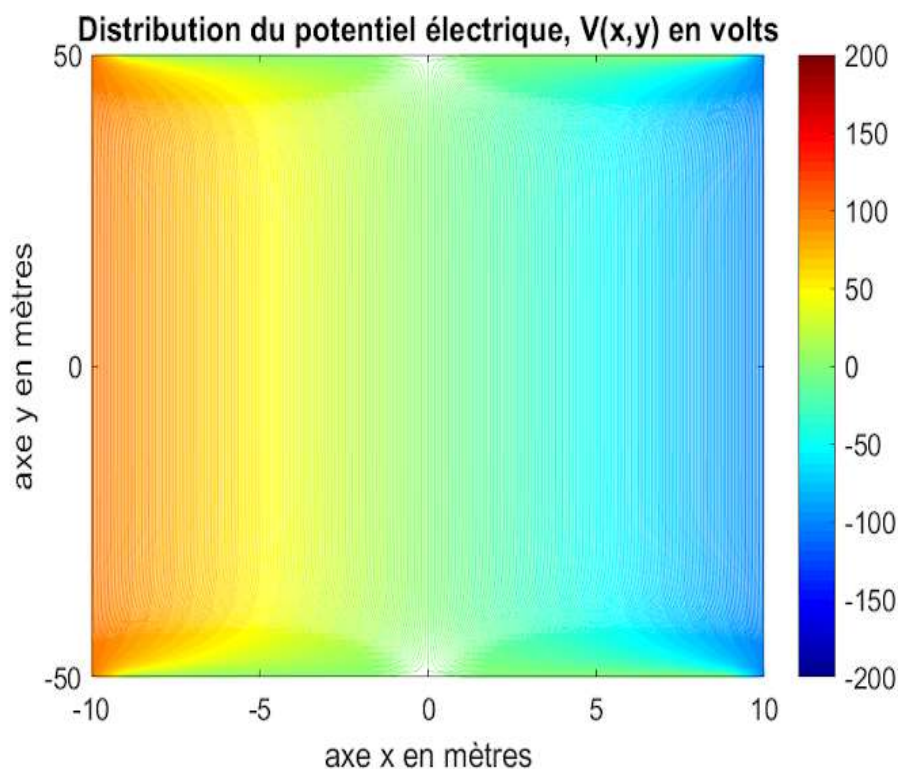


Figure 9 : Modélisation numérique montrant la distribution du potentiel dans le cadre d'un condensateur plan, avec une électrode de potentiel -100V et l'autre de 100V

- Pointe / électrode plan

Nous avons modélisé une pointe par un groupement de charges ponctuelles formant un cône, en face de laquelle se trouve une électrode plane. Les équipotentielles obtenues ne traduisent pas un effet de pointe conséquent car elles forment des arcs de cercle autour de la pointe toute entière et pas autour de son extrémité. Cela est dû au fait que le potentiel est constant dans la pointe modélisée et donc qu'il ne soit pas plus important à son extrémité. Cependant, comme nous avons remarqué dans nos expériences avec une pointe, les équipotentielles deviennent parallèles à l'approche de l'électrode plane.

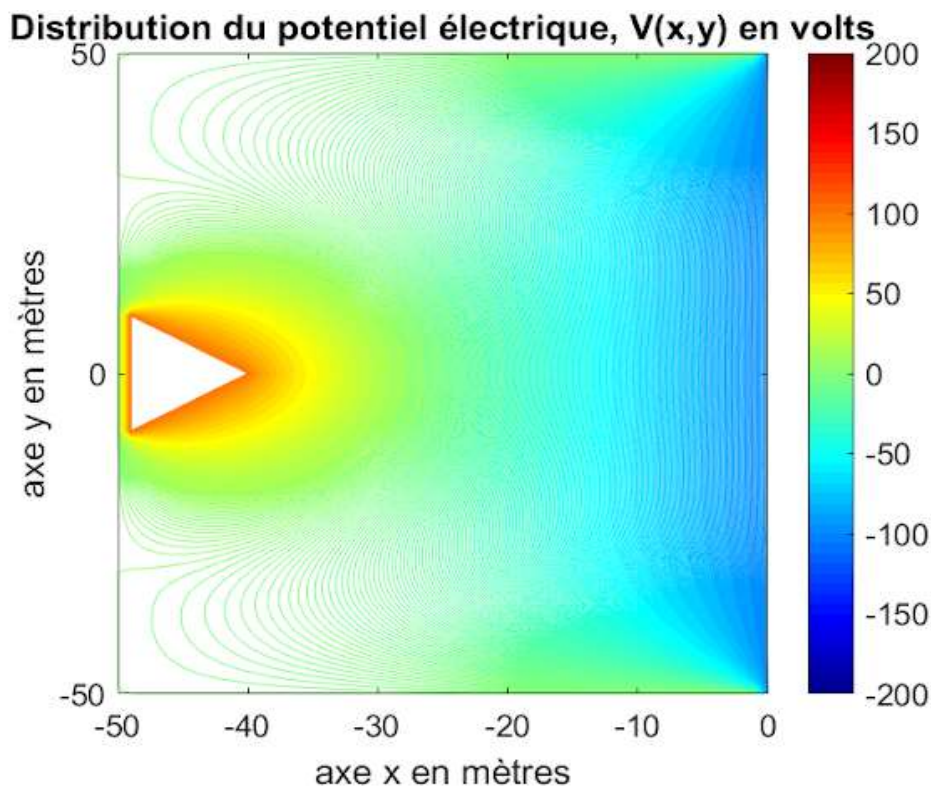


Figure 10 : Modélisation numérique montrant la distribution du potentiel créé par une électrode de potentiel -100V et une pointe de potentiel 100V

- Pointe à bout plat / électrode plan

Nous avons ensuite modélisé un échantillon qui aurait déjà été en partie évaporé, par une pointe de potentiel constant dont le bout est plat. Cette modélisation devait illustrer le fait que l'effet de pointe est moindre lorsque la pointe est moins fine ; ce qui justifie l'application d'un potentiel plus élevé, pour conserver un effet de pointe conséquent, lorsque plusieurs couches de l'échantillon ont déjà été évaporées. Cependant, pour la pointe complète, nous n'avons pas observé d'effet de pointe important, de ce fait il est difficile de comparer les deux modélisations et donc de montrer que pour la deuxième, l'effet de pointe est plus faible.

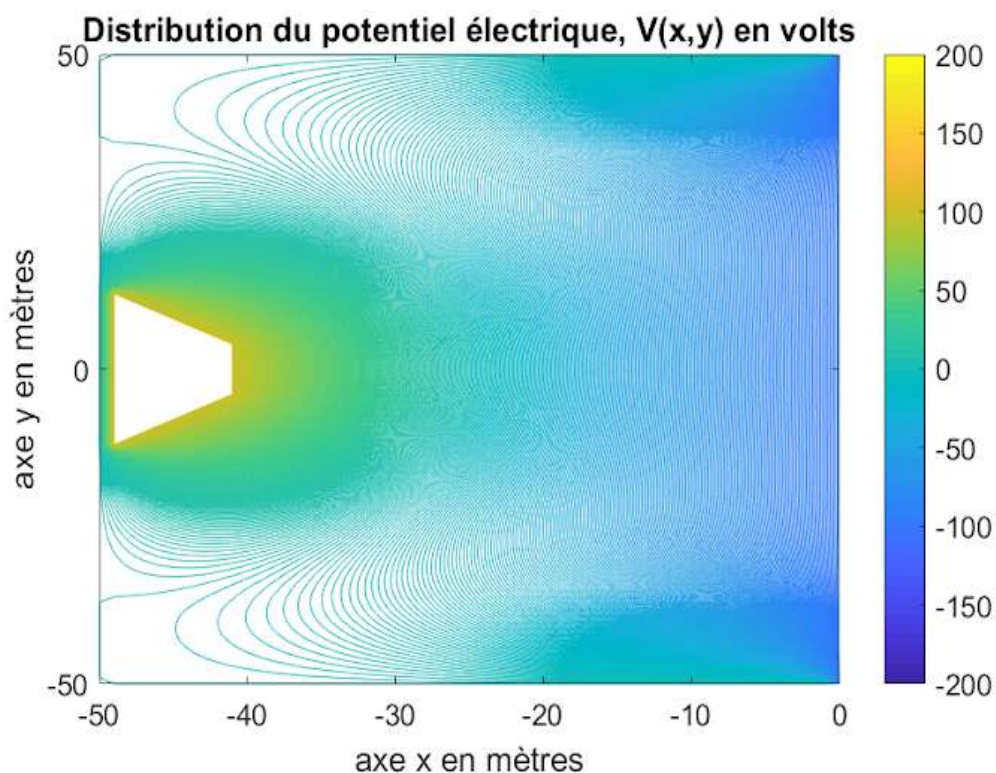


Figure 11 : Modélisation numérique montrant la distribution du potentiel créé par une pointe à bout aplati et de potentiel 100V

- Pointe de potentiel nul à l'intérieur / électrode plan

La troisième pointe que nous avons modélisée peut correspondre à une pointe dont le potentiel est nul à l'intérieur et de 100V sur les bords, elle est formée par un triangle de charges ponctuelles. Un effet de pointe est nettement visible car des lignes de fort potentiel sont très resserrées autour de la pointe, de plus à l'aide de l'échelle de couleur on remarque que le potentiel à son bout est plus élevé que le potentiel de chaque charge ponctuelle. Ce qui s'explique par la différence de potentiel entre le centre et l'extrémité de la pointe. De même que précédemment, les équipotentielles deviennent parallèles à l'électrode proche de celle-ci.

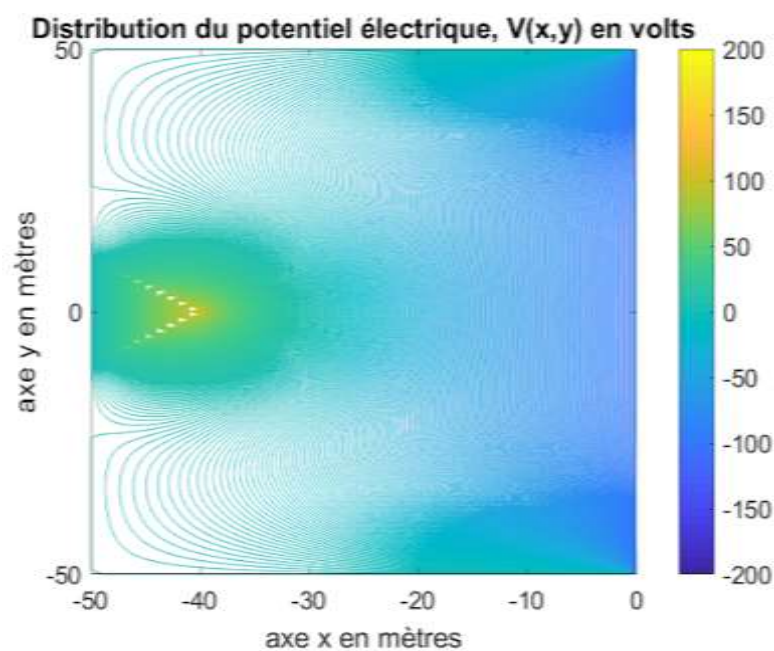


Figure 12 : Modélisation numérique montrant la distribution du potentiel créé par une pointe seule de potentiel 100V sur ses contours et de potentiel nul à l'intérieur

Les cartes de potentiel obtenues numériquement et expérimentalement sont très proches bien que le potentiel appliqué dans les électrodes soit très différent. Cela nous permet de conclure qu'au bout d'une pointe à laquelle est appliquée un potentiel positif, il se forme un effet de pointe dont l'importance augmente avec le potentiel et avec la finesse de la pointe.

Une limite de notre modèle est le calcul et la représentation en 2 dimensions des équipotentielles. Une représentation en 3 dimensions aurait sans doute permis d'observer un effet de pointe plus important.

Pour résumer et mettre en lien avec le fonctionnement de la sonde atomique tomographique, le champ électrostatique au bout de la pointe composée du matériau analysé est assez élevé pour ioniser les atomes. Ceux-ci vont alors perdre un ou plusieurs électrons et devenir des cations. Le fort potentiel positif provenant de la pointe va avoir un effet répulsif sur ces cations, selon la loi de Coulomb (puisque deux charges de même signe se repoussent), qui vont alors suivre les lignes de champ électrostatique mises en avant durant nos expériences, et arriver sur l'écran de détection afin que leur position soit analysée. En effet la force répulsive dépend directement de la valeur du champ électrostatique : $\vec{F} = q\vec{E}$ (force de Lorentz). Le but de la pointe est finalement d'augmenter le champ électrostatique en surface afin d'atteindre l'énergie suffisante pour décrocher et ioniser les atomes un par un (voir figure 2).

3.4. Domaines d'application de la sonde atomique

Les applications de la sonde atomique se sont étendues au fil des améliorations qui ont été apportées à l'instrument.

Lorsque son champ d'application était limité aux métaux, elle était utilisée principalement dans les domaines du nucléaire, de l'automobile ou encore de l'aéronautique. La sonde y est utilisée pour observer les propriétés des matériaux telles que les impuretés ou bien la ségrégation intergranulaire, qui caractérise l'espace vacant entre deux grains d'un matériau qui permet à la longue à des impuretés de s'y loger. Ainsi, cet instrument permet aux chercheurs de déterminer si un matériau est adapté à une application particulière. Il peut aussi arriver qu'un matériau soit traité avant d'être utilisé, l'efficacité du traitement sur la structure de ce dernier est alors observable avec la sonde atomique.

Dans le nucléaire la sonde permet par exemple de voir quel métal utiliser pour que les cuves soient résistantes dans le temps et ne soient pas usées par les radiations, et comment les traiter pour qu'elles ne soient plus fragilisées.

De même, l'automobile se sert également de cet instrument pour trouver quelle modification apporter à un métal, qui formera la carrosserie, pour que celui-ci soit plus résistant.

L'apparition de la sonde atomique tomographique laser, et donc de la possibilité d'analyser des matériaux non métalliques, a ouvert la voie à de nouveaux domaines d'applications comme les nanosciences ou les nanotechnologies. Elle y est également utilisée pour déterminer avec précision les propriétés de matériaux. Par exemple, la sonde atomique est aujourd'hui utilisée pour imager la disposition 3D dans les dispositifs électriques, et permet ainsi d'optimiser la répartition des transistors dans de tels appareils.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Notre étude nous a montré que la sonde atomique tomographique est un instrument d'imagerie 3D permettant d'analyser la structure spatiale et la nature chimique des matériaux avec des résultats plus précis que ceux que proposent les techniques d'imagerie conventionnelles. La sonde atomique n'a pas cessé d'être améliorée depuis sa découverte et la création du premier prototype par Le Groupe de Physique des matériaux de Rouen (UMR CNRS 6634) à la moitié du 2^{ème} siècle. Reposant sur des principes simples d'électromagnétisme et notamment sur l'effet de pointe, ses applications, qui se sont étendues en même temps que ses capacités, sont multiples et dans tous les domaines. Ces éléments en font un instrument qui a encore un avenir prometteur dans le domaine de la recherche et du développement scientifique. Ainsi, notre travail pourrait être complété dans le futur pour suivre les évolutions à venir que la sonde atomique ne manquera pas de connaître.

D'autre part, à titre personnel, ce projet a été pour nous une source d'enrichissement sur les plans scientifique et organisationnel.

Effectuer nos recherches nous aura permis d'approfondir les connaissances que nous avons reçues en électromagnétisme et de découvrir une de ses applications concrètes que nous ne connaissions pas.

Il nous a également forcé à nous organiser au mieux pour pouvoir travailler en groupe de manière efficace et rendre un travail de qualité dans les temps.

5. BIBLIOGRAPHIE

Alain Menand et Didier Blavette "Un voyage au coeur des matériaux à l'échelle atomique"

https://fr.wikipedia.org/wiki/Sonde_atomique_tomographique (27/05/2019)

<https://webtv.univ-rouen.fr/videos/un-instrument-et-des-hommes-laventure-de-la-sonde-atomique-a-rouen/> (27/05/2019)

http://iramis.cea.fr/Phocea/Vie_des_labos/Ast/ast.php?t=fait_marquant&id_ast=2694 (27/05/2019)

<https://www.cameca.com/products/apt/technique> (27/05/2019)

https://en.wikipedia.org/wiki/Atom_probe (27/05/2019)

<http://gpm.univ-rouen.fr/fr/departements/instrum/eris/theme/activ3> (27/05/2019)

https://www.google.com/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&ved=2ahUKEwiMofu26vThAhWHAmMBHRPoAEAQjRx6BAgBEAQ&url=https%3A%2F%2Fnational.udppc.asso.fr%2Fattachments%2Farticle%2FArporteur_du_web_Champ_Electrique.pdf&psig=AOvVaw0vOQFZS3JSeSHHVMNwX9ty&ust=155661113909520 (27/05/2019)

https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_de_pointehttps://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_de_pointe (27/05/2019)

<https://www.gralon.net/articles/materiel-et-consommables/materiels-industriels/article-le-paratonnerre---presentation-et-fonctionnement-2802.htm> (27/05/2019)

http://www.lerepairedessciences.fr/sciences/questions_sciences/paratonnerre.htm (27/05/2019)

<https://fr.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/42773-electric-field-of-a-parallel-plate-capacitor-using-2d-poisson-equation> (03/06/2019)

Ainsi que des documents appartenant au groupe de physique des matériaux de Rouen.

6. ANNEXES

6.1. Programme réalisé

La base du code utilisé pour les modélisations numériques est celle provenant du site MathWorks (<https://fr.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/42773-electric-field-of-a-parallel-plate-capacitor-using-2d-poisson-equation>).

Ce code permet d'étudier le champ et le potentiel uniquement pour un condensateur plan ; il dessine une zone rectangulaire, dont les bords ont un potentiel nul, dans laquelle le potentiel est calculé en chaque point.

Pour réaliser nos modélisations nous avons donc modifié la partie du code concernant la position et la forme des électrodes. Ce qui correspond, pour la modélisation du condensateur plan, aux lignes de code surlignées en vert.

Dans le code suivant, la partie surlignée en rouge est la partie modifiée permettant de modéliser la pointe à bout plat de potentiel constant.

```
%-----%
% This simple program computes the Electric Fields due to
% Parallel plate Capacitors using the Finite difference method (FDM)
%-----%
clc
close all; clear all;
%-----%
%          SYMBOLS USED IN THIS CODE
%-----%
% E = Total electric field matrix using Poisson's equation
% V = Potential matrix
% Nx = Number of grid points in X- direction
% Ny = Number of grid points in Y-Direction
%-----%
%-----%
%          INITIALIZATION
%      Here, all the grid, size, charges, etc. are defined
%-----%
% Enter the dimensions
Nx = 101; % Number of X-grids
Ny = 101; % Number of Y-grids
```

```

mpx = ceil(Nx/2); % Mid-point of x
mpy = ceil(Ny/2); % Mid point of y

Ni = 1000; % Number of iterations for the Poisson solver
V = zeros(Nx,Ny); % Potential (Voltage) matrix
T = 0;      % Top-wall potential
B = 0;      % Bottom-wall potential
L = 0;      % Left-wall potential
R = 0;      % Right-wall potential
%-----%
% Initializing edges potentials
%-----%
V(1,:) = L;
V(Nx,:) = R;
V(:,1) = B;
V(:,Ny) = T;
%-----%
% Initializing Corner potentials
%-----%
V(1,1) = 0.5*(V(1,2)+V(2,1));
V(Nx,1) = 0.5*(V(Nx-1,1)+V(Nx,2));
V(1,Ny) = 0.5*(V(1,Ny-1)+V(2,Ny));
V(Nx,Ny) = 0.5*(V(Nx,Ny-1)+V(Nx-1,Ny));
%-----%
length_plate = 51; % Length of plate in terms of number of grids
lp = floor(length_plate/2);
position_plate = 15; % Position of plate on x axis
pp1 = mpx+position_plate;
pp2 = mpx-position_plate;
for z = 1:Ni % Number of iterations

    for i=2:Nx-1
        for j=2:Ny-1

            % The next two lines are meant to force the matrix to hold the
            % potential values for all iterations

```

```
% V(mpx-40,mpy) = 100;
V(mpx-41,mpy-4:mpy+4) = 100;
V(mpx-42,mpy-5:mpy+5) = 100;
V(mpx-43,mpy-6:mpy+6) = 100;
V(mpx-44,mpy-7:mpy+7) = 100;
V(mpx-45,mpy-8:mpy+8) = 100;
V(mpx-46,mpy-9:mpy+9) = 100;
V(mpx-47,mpy-10:mpy+10) = 100;
V(mpx-48,mpy-11:mpy+11) = 100;
V(mpx-49,mpy-12:mpy+12) = 100;
V(mpx,mpy-50:mpy+50) = -100;
% V(pp1,mpy-lp:mpy+lp) = -100;
```

$$V(i,j)=0.25*(V(i+1,j)+V(i-1,j)+V(i,j+1)+V(i,j-1));$$

end

end

end

% Take transpose for proper x-y orientation

V = V';

[Ex,Ey]=gradient(V);

Ex = -Ex;

Ey = -Ey;

% Electric field Magnitude

E = sqrt(Ex.^2+Ey.^2);

x = (1:Nx)-mpx;

y = (1:Ny)-mpy;

% Contour Display for electric potential

figure(1)

contour_range_V = -101:0.5:101;

contour(x,y,V,contour_range_V,'linewidth',0.5);

axis([min(x) max(x) min(y) max(y)]);

colorbar('location','eastoutside','fontsize',14);

xlabel('axe x en mètres','fontsize',14);

ylabel('axe y en mètres','fontsize',14);

title('Distribution du potentiel électrique, V(x,y) en volts','fontsize',14);

```

h1=gca;
set(h1,'fontsize',14);
fh1 = figure(1);
set(fh1, 'color', 'white')
% Contour Display for electric field
% figure(2)
% contour_range_E = -20:0.05:20;
% contour(x,y,E,contour_range_E,'linewidth',0.5);
% axis([min(x) max(x) min(y) max(y)]);
% colorbar('location','eastoutside','fontsize',14);
% xlabel('x-axis in meters','fontsize',14);
% ylabel('y-axis in meters','fontsize',14);
% title('Electric field distribution, E (x,y) in V/m','fontsize',14);
% h2=gca;
% set(h2,'fontsize',14);
% fh2 = figure(2);
% set(fh2, 'color', 'white')
% Quiver Display for electric field Lines
% figure(3)
% contour(x,y,E,'linewidth',0.5);
% hold on, quiver(x,y,Ex,Ey,2)
% title('Electric field Lines, E (x,y) in V/m','fontsize',14);
% axis([min(x) max(x) min(y) max(y)]);
% colorbar('location','eastoutside','fontsize',14);
% xlabel('x-axis in meters','fontsize',14);
% ylabel('y-axis in meters','fontsize',14);
% h3=gca;
% set(h3,'fontsize',14);
% fh3 = figure(3);
% set(fh3, 'color', 'white')
%-----%
% REFERENCE
%     SADIKU, ELEMENTS OF ELECTROMAGNETICS, 4TH EDITION, OXFORD
%-----%

```