

Cartographie du potentiel électrostatique

par Jean-Michel FRIEDT

Laboratoire de microanalyse nucléaire
UFR-ST La Bouloie - 25000 Besançon
friedtj@free.fr

RÉSUMÉ

Nous reproduisons dans cet article des expériences de cartographie du potentiel sur une feuille de papier faiblement conductrice et exploitons les données issues de ces mesures pour illustrer la validité des modèles électrostatiques enseignés classiquement en premier cycle universitaire. Le montage expérimental est basé sur une table traçante dont le stylo est remplacé par une pointe métallique qui cartographie la valeur du potentiel en un grand nombre de points alors que des potentiels électriques sont appliqués aux électrodes en pâte à l'argent tracées sur le substrat faiblement conducteur.

1. INTRODUCTION

Nous reprenons un montage développé et publié par R.A. YOUNG [1, 2] visant à illustrer expérimentalement la distribution de champ électrostatique pour diverses configurations d'électrodes. Le montage présenté s'inspire des microscopes à sonde locale [3, 4, 5] où un capteur d'une grandeur physique, ici le potentiel électrique, balaye la surface à analyser pour cartographier l'évolution de la grandeur physique considérée. Ici, nous nous intéressons à l'évolution du potentiel électrique sur une surface faiblement conductrice, sur laquelle ont été tracées des électrodes conductrices pour définir des potentiels en certaines régions.

2. MÉTHODE EXPÉRIMENTALE

Une difficulté à la lecture des articles de YOUNG [1, 2] est la nature des feuilles de papier faiblement conductrices. Une solution est fournie dans la référence [6] qui indique que le papier Canson noir est chargé en carbone et donc faiblement conducteur. Nous utilisons ce type de papier⁽¹⁾, sur lequel sont tracées des électrodes au moyen de pâte à l'argent pour définir les potentiels. Une table traçante (plotter Roland DXY-1200) dont le stylo est remplacé par une pointe de contact électrique relié à un convertisseur analogique-numérique permet d'effectuer la cartographie du potentiel à la surface du papier.

Deux difficultés expérimentales viennent d'une part de la fragilité des lignes tracées

(1) Papier Canson mi-teintes noir, 160 g/cm² (réf. 367-102), vingt feuilles A4 pour moins de 5 €.

à la pâte à l'argent, très friable, et d'autre part de la force requise pour appuyer suffisamment la pointe sur la surface pour obtenir un bon contact électrique. Le second problème est en parti résolu par l'utilisation de pointes de contact montées sur ressort telles que disponibles par exemple chez RS Components ⁽²⁾ (*spring probes*, références 434-762 ou 261-5092 selon que l'extrémité soit en pointe ou arrondie). Toutes les colles à l'argent colloïdales testées au cours du développement de cette expérience sont friables et forment des électrodes fragiles qui doivent être retracées avant chaque nouveau scan. Nous avons utilisé les colles colloïdales habituellement utilisées pour la correction des pistes de circuit imprimé (RS Components référence 496-243 ou réf. [7]) ou en microscopie électronique (sous la dénomination *colloidal silver paste* - penser à commander le diluant correspondant car ces solutions deviennent rapidement trop visqueuses pour être utilisables). Il vaut mieux éviter les colles époxy à l'argent venant en deux composantes qui sont généralement trop visqueuses pour permettre de tracer des électrodes fines sur le papier Canson.

Le montage expérimental est basé sur une expérience décrite antérieurement [5] : une table traçante est utilisée pour déplacer en un grand nombre de points une sonde de la quantité physique à mesurer, ici le potentiel électrique (cf. figure 1). Dans le montage présenté ici, la sonde est fixée à la partie mobile (le porte-stylo de la table traçante) tandis que l'échantillon (la feuille de papier Canson noire) est fixe. La pointe est reliée à une carte de conversion analogique-numérique pour permettre un traitement ultérieur des données obtenues au cours du balayage : tracé du potentiel électrique en fonction de la position de la pointe, puis calcul du gradient pour obtenir le champ électrique et éventuellement calcul du Laplacien pour visualiser la distribution de charges.

Il faut prendre soin d'introduire un amplificateur opérationnel monté en suiveur de tension entre la sonde (pointe conductrice) et la carte d'acquisition analogique-numérique. En effet, l'impédance d'entrée des convertisseurs analogique-numérique utilisés au cours du développement de cette expérience (AD574A ou carte commerciale National Instruments PC-LPM-16 basée sur un ADC1241 ont une impédance d'entrée typiquement de l'ordre de 5 à 10 k Ω) est trop faible par rapport à l'impédance du papier Canson noir. De ce fait, le pont diviseur de tension formé par les électrodes définissant les potentiels sur le papier et la pointe de mesure est perturbé par cet appel de courant : la condition de pont diviseur non-chargé en l'absence du montage suiveur n'est pas vérifiée du fait du courant circulant dans la branche entre les deux résistances. Le résultat est une mesure inexacte et bruitée. L'introduction d'un suiveur de tension (nous avons utilisé pour cela un OP113 en alimentation asymétrique connecté à l'alimentation de l'ordinateur) résout ce problème.

3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET TRAITEMENT DES DONNÉES

Plusieurs géométries d'électrodes ont été tracées pour connaître les distributions du potentiel φ correspondantes. Nous en déduisons le champ électrique ($\vec{E} = -\vec{\nabla}\varphi$) et éven-

(2) <http://www.rs-components.com/>

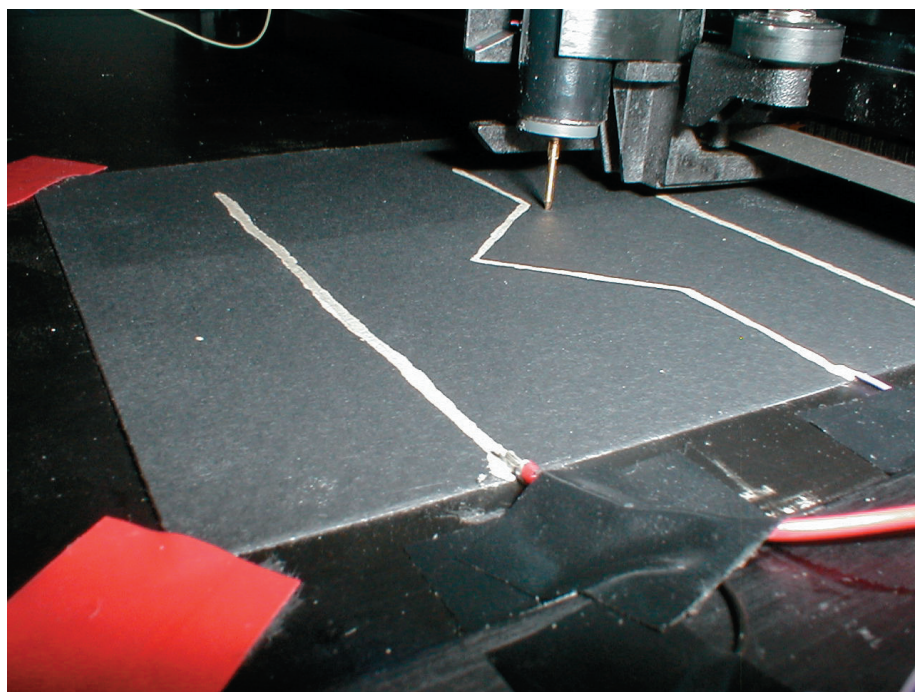


Figure 1 : Montage expérimental : une pointe conductrice montée sur ressort est fixée à la partie mobile de la table traçante, tandis que la feuille de Canson noire sur laquelle sont tracées les électrodes en pâte à l'argent est maintenue fixe sous la sonde.

tuellement la distribution de charges ($\rho \propto \Delta\phi$). Le pas entre deux mesures est toujours de $250\ \mu\text{m}$ bien que les tables traçantes puissent imager à une résolution allant jusqu'à $25\ \mu\text{m}/\text{pixel}$ (résolution qui n'est pas nécessaire ici et qui allonge considérablement le temps de scan). Un peu de traitement d'images sur les données brutes est parfois nécessaire pour permettre les opérations de dérivation successives qui sont très sensibles aux bruits sur les données brutes : convolution par un filtre passe bande local si la dérivée première du potentiel est trop importante (erreur de mesure liée à un mauvais contact ou une inhomogénéité de la conductivité du papier Canson). Toutes les opérations de traitement de données et d'affichage graphique des résultats ont été effectuées sous Matlab (version 5.3 sous Windows 98). Un logiciel opensource gratuit équivalent, *octave*, est disponible mais manque encore de nombreuses fonctionnalités dont nous ferons usage ici (fonctions `gradient()` et `quiver()` pour le tracé du champ électrique).

3.1. Traitement des données brutes

Avant tout affichage ou analyse des cartes du potentiel, deux opérations sont effectuées sur toutes les images : retirer les points dont les mesures diffèrent trop de celles de

leurs voisins, et compensation du jeu de la pointe. Ce second point est lié au fait que nous conservons les potentiels mesurés selon les deux directions de cartographie (que nous pouvons appeler « aller » et « retour »). Le problème existe aussi en microscopie à sonde locale, où l'hystérésis de l'actuateur de la sonde peut induire des erreurs d'alignement des lignes balayées dans une direction ou une autre : Molecular Imaging⁽³⁾ (fabriquant du microscope à force atomique PicoSPM) évite ce problème par exemple en n'affichant que les données obtenues dans une certaine direction (soit « aller », soit « retour ») mais au prix d'un temps de balayage excessivement long. Dans notre cas, l'erreur d'alignement est obtenue soit graphiquement en traçant deux lignes successives (d'ordonnée paire et impaire) et en notant l'écart entre deux points que nous savons devoir être alignés (par exemple une électrode tracée sur le papier Canson), soit de façon automatique en recherchant le maximum de l'intercorrélacion de deux lignes successives (fonction `xcorr` sous Matlab). Les deux méthodes nous donnent le même résultat, à savoir une erreur de quatre pixels (*i.e.* 1 mm) d'alignement entre les lignes paires et impaires, que nous compensons numériquement après acquisition des données.

Nous commençons donc par charger l'image (les points issus de la mesure sont supposés être stockés dans une matrice dans le fichier nommé `img.dat`) en mémoire :

```
load img.dat;
s=size(img);haut=s(1);large=s(2);
for i=1:2:haut
disp(i)
final(i,:)=img(i,:);
final(i+1,:)=fliplr(img(i+1,:));
end
```

Puis nous retirons les points dont la mesure diffère trop de celle de ses voisins :

```
bruit=(diff(final)>200);
final(2:haut,1:large)=final(2:haut,1:large).*(1-bruit); final=final';
bruit=(diff(final)>200);
final(2:haut,1:large)=final(2:haut,1:large).*(1-bruit); final=final';
pasbon=(final(2:haut-1,2:large-1)==0);
final(2:haut-1,2:large-1)=final(2:haut-1,2:large-1)+pasbon.*final(2:haut-1,3:large);
pasbon=(final(2:haut-1,2:large-1)==0);
final(2:haut-1,2:large-1)=final(2:haut-1,2:large-1)+pasbon.*final(3:haut,2:large-1);
pasbon=(final(2:haut-1,2:large-1)==0);
final(2:haut-1,2:large-1)=final(2:haut-1,2:large-1)+pasbon.*final(3:haut,3:large);
```

Nous pouvons à ce point éventuellement compenser le jeu de la pointe en alignant les lignes tracées dans un sens sur celle tracées dans l'autre sens (compensation des quatre pixels de jeu entre les déplacements dans des sens opposés).

```
tmp(1:haut,1:2:large)=final(:,1:2:large);
tmp(5:haut+4,2:2:large)=final(:,2:2:large);
final=tmp;haut=haut+4;
```

(3) <http://www.molec.com>

Enfin, nous traçons la carte du potentiel et y superposons le champ :

```
imagesc(final');hold on;
x=1:10:haut;y=1:10:large;zz=-final(x,y)';
[px,py]=gradient(zz,.2,.2);quiver(x,y,px,py,2)';
title('V, E=-\nabla V');xlabel('X (250 \mum/pixel)');ylabel('Y (250 \mum/pixel)')
colorbar
```

Pour toutes les configurations d'électrodes analysées, nous présentons à gauche le résultat de la mesure (cartographie du potentiel électrostatique à laquelle est superposée le champ électrique déduit des données expérimentales) et à droite la configuration des électrodes tracées sur le papier Canson noir (scannées une fois l'expérience de cartographie du champ achevée). Dans toutes les images qui suivent, le rouge indique un potentiel de + 5 V et le bleu un potentiel de 0 V.

3.2. Aspects théoriques

L'objectif de cet article est d'illustrer une méthode de cartographie du champ électrostatique et de comparer les résultats obtenus avec la théorie : un rapide rappel des méthodes numériques pour prédire le potentiel sur une surface est donc nécessaire. Le problème que nous devons résoudre est de connaître la distribution du potentiel électrostatique φ vérifiant $\rho \propto \Delta\varphi = 0$ (absence de charges) avec des conditions aux limites définies par les motifs tracés à la pâte à l'argent sur les feuilles de papier Canson.

Une méthode de résolution largement citée dans la littérature est l'utilisation de la transformée conforme dite de Schwartz-Christoffel [8, 9 (p. 130)]. Cette opération permet de passer d'une configuration d'électrodes pour laquelle une expression analytique du potentiel est connu (par exemple entre deux plaques infinies d'un condensateur où le champ est uniforme, *i.e.* le potentiel évolue linéairement de sa valeur imposée à une des électrodes au potentiel à l'autre électrode) à la configuration des électrodes représentant le problème qui nous intéresse, tel que nous le présentons à la figure 4. L'opération consiste à identifier une transformée conforme convertissant la géométrie d'électrodes pour laquelle le potentiel est connu en la géométrie du problème étudié. Il est possible de démontrer qu'une telle transformation conserve la relation $\Delta\varphi = 0$ et que par conséquent la solution ainsi obtenue vérifie bien la propriété recherchée, à savoir $\Delta\varphi = 0$. Nous ne nous attardons pas sur les aspects théoriques de cette méthode de résolution et nous contentons de citer les mots clés permettant au lecteur de trouver la littérature appropriée, ainsi que la disponibilité d'un excellent ensemble de routines pour Matlab permettant de tracer les solutions de cette transformée : il s'agit de la Schwartz-Christoffel toolbox de Tobin A. DRISCOLL disponible à l'adresse suivante ⁽⁴⁾.

3.3. Le condensateur de dimensions finies

Nous commençons par le cas le plus simple de deux plaques parallèles auxquelles

(4) <http://www.math.udel.edu/z.driscoll/SC/index.html>

sont appliqués les potentiels de 0 et + 5 V (*cf.* figure 2). Nous constatons, comme prévu par la théorie, que le potentiel varie linéairement entre les électrodes. Cette expérience ajoute cependant une information nouvelle avec la distribution du potentiel au-delà des électrodes, et illustre la façon dont le champ électrique dépasse du condensateur.

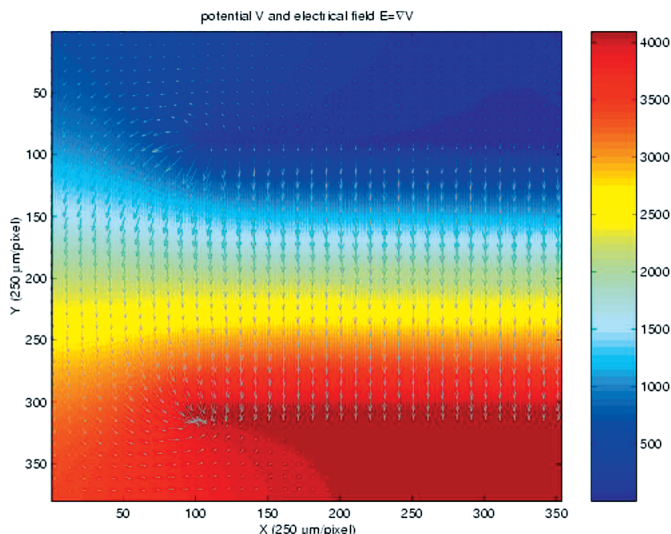


Figure 2 : Potentiel et champ électrique déduit par calcul du gradient des données mesurées pour une configuration de condensateur entre deux plaques planes. La géométrie des électrodes est présentée à la figure 7 (droite) : cette carte du potentiel a été mesurée avant l'ajout des deux modifications circulaire et vertical entre les électrodes horizontales.

3.4. Le dipôle et la pointe

Cet exemple, illustré ici à la figure 3, est traité analytiquement dans [8 (p. 137)], et l'intérêt technologique de modéliser le champ électrostatique d'une pointe à un potentiel élevé par rapport à son environnement est décrit dans [10 (p. 107-110)]. Nous avons superposé aux données expérimentales une cartographie obtenue par simulation du potentiel issu d'une pointe en l'absence de ligne de masse (qui est présente dans le dispositif expérimental à l'abscisse $X = 150$). Nous constatons que l'effet de cette électrode à la masse est de concentrer les lignes de champ contre la pointe alors que pour une pointe dans le vide, les lignes de champ seraient encore influencées par la pointe à cette distance.

Un intérêt technologique plus récent de l'effet de pointe est le développement des dispositifs utilisant l'effet de champ, par exemple pour la réalisation d'afficheurs. Le principe est d'utiliser une matrices de pointes conductrices pour atteindre un champ électrique suffisamment élevé tout en appliquant un potentiel faible pour atteindre le seuil permettant d'arracher des électrons à la surface du conducteur (et ainsi d'illuminer un pixel couvert de phosphore). La pointe ultime en terme de dimensions est le nanotube de

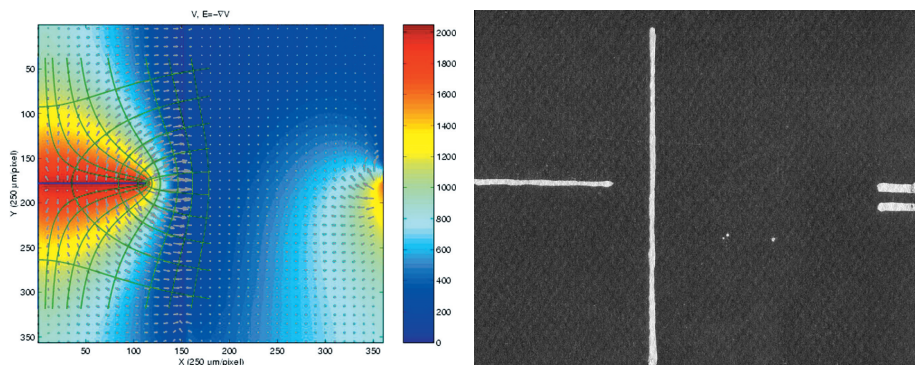
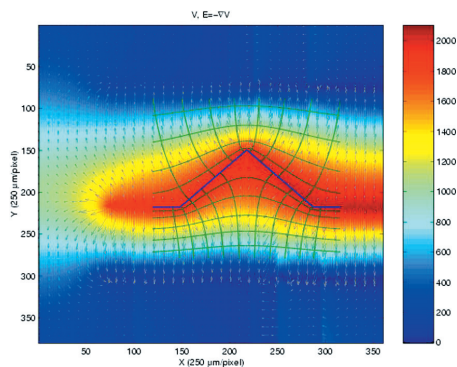


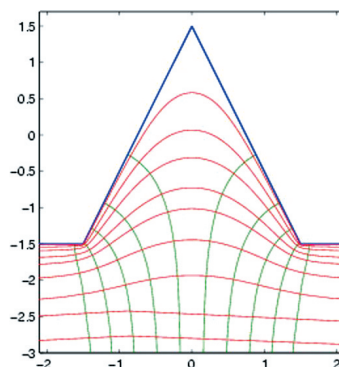
Figure 3 : Deux configurations tracées sur une même feuille : à gauche de la feuille une pointe en direction d'un plan à la masse, et à droite de la feuille deux charges de signes opposés.

carbone : le champ électrique au-dessus d'une électrode couverte de telles pointes a été cartographié au moyen d'un microscope à effet tunnel dont le principe de fonctionnement est, à une échelle réduite d'un facteur 10^4 , similaire au dispositif présenté ici [11].

3.5. Les angles



Simulation et données expérimentales pour un angle de 90°.



Simulation pour un angle de 60° (rouge : équipotentielles, vert : lignes de champ électrique).

Figure 4

Gauche : superposition des données expérimentales et simulations basées sur la transformation conforme illustrant l'adéquation du modèle aux valeurs mesurées pour un coin conducteur formant un angle de 90°. *Droite* : tracé des lignes équipotentielles et de champ pour un coin conducteur formant un angle de 60°.

Les références [8 (p. 143, 145)] et [12 (p. 77)] présentent différentes méthodes de calcul prédisant la dépendance du potentiel électrique à l'intérieur d'un secteur angulaire d'ouverture β : la loi de puissance du potentiel au niveau de l'axe de symétrie du secteur angulaire est en $\varphi \propto \rho^{\frac{\pi}{\beta}}$ où ρ est la distance au sommet de l'angle. Nous vérifions que la

loi est convenablement vérifiée sur la figure 5.

3.6. Structures interdigitées

Les structures interdigitées (*cf.* figure 6) sont utilisées dans de nombreux types de capteurs [13, 14, 15]. Si leurs dimensions sont très petites devant la longueur d'onde du potentiel électrique oscillant qui les polarise, le champ autour des électrodes peut être en première approximation visualisé comme un champ électrostatique tel que décrit ici.

L'utilisation de la transformation conforme permet de convertir une paire d'électrodes parallèles formant un condensateur (pour lequel le champ électrique est connu) en une structure interdigitée telle que présentée ici dont le champ électrique est alors déduit [9]. Ces résultats sont aussi valables pour comprendre l'efficacité d'une chambre de Faraday formée d'un maillage fin devant la longueur d'onde du signal électromagnétique incident : le grillage se comporte comme une plaque continue en champ lointain (*i.e.* à une distance supérieure à la périodicité du maillage).

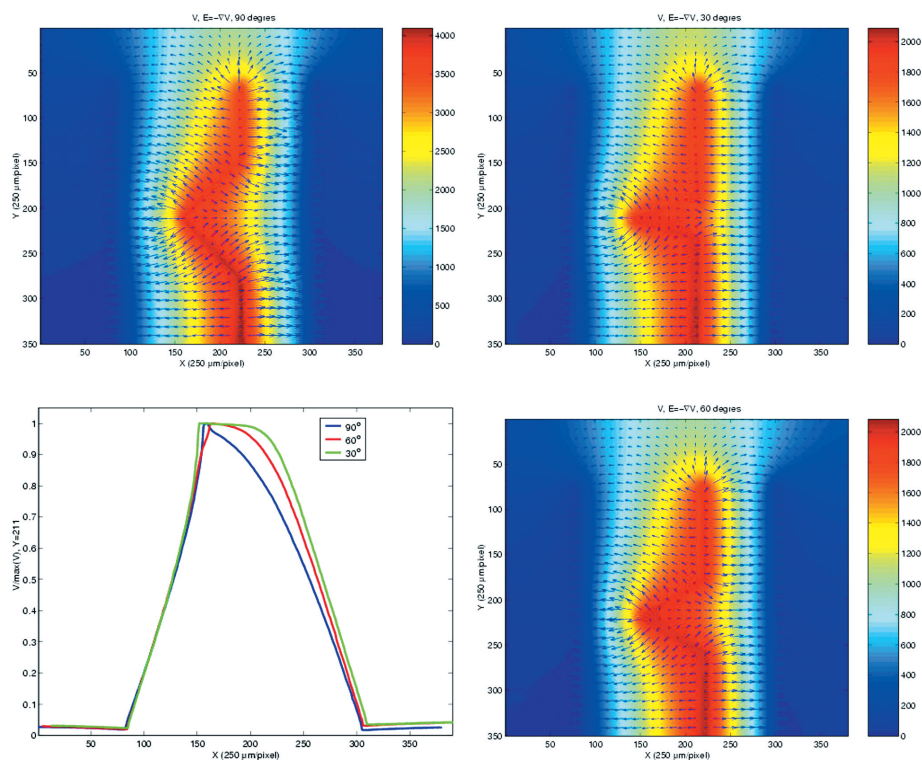


Figure 5 : Cartographie du potentiel électrostatique pour des coins conducteurs formant divers angles (30, 60 et 90°) et, en bas à gauche, tracé de l'évolution du potentiel selon l'axe de symétrie (« horizontale ») autour de l'ordonnée $y = 200$ du coin permettant de vérifier l'évolution de la loi de puissance prédite par la théorie.

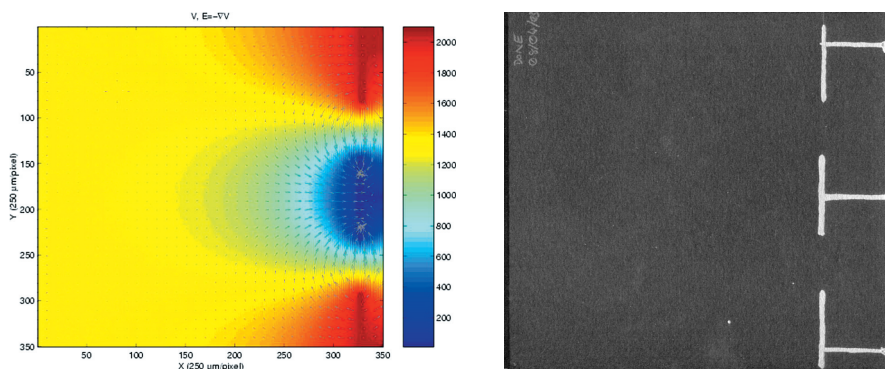


Figure 6 : Cartographie du potentiel électrostatique pour une configuration de structure interdigitée.

3.7. Le dipôle induit

Nous illustrons ici (cf. figure 7) la distribution de charges induite par l'introduction d'un conducteur (à potentiel flottant) dans un champ électrique. Nous avons vu précédemment quelle est la distribution du potentiel électrostatique entre deux plaques parallèles : nous ajoutons maintenant entre ces deux plaques deux motifs, l'un circulaire et l'autre allongé dans la direction normale aux électrodes et observons de quelle façon la distribution de potentiel et donc le champ électrostatique sont perturbés. Ces motifs additionnels étant conducteurs, le potentiel doit être uniforme sur leur ensemble. Le potentiel électrostatique ne variant alors plus linéairement entre les électrodes auxquelles sont appliquées les tensions de polarisation, nous observons, comme prévu par la théorie, que les lignes de champ convergent vers les motifs conducteurs pour être normales à leur surface, et que le calcul du Laplacien du potentiel présente bien la distribution de charge prédite sur le disque. Les données pour le motif rectiligne sont trop bruitées pour permettre une analyse.

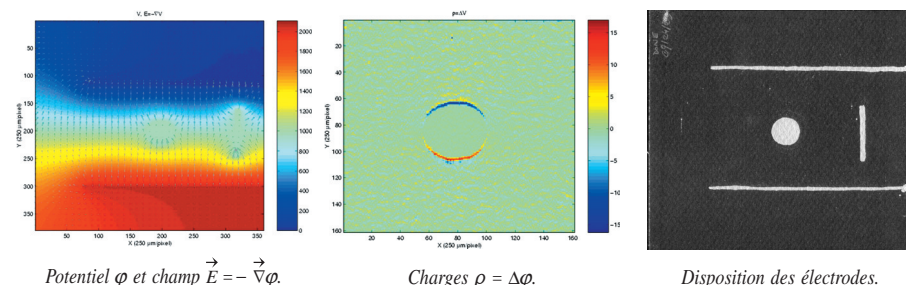


Figure 7 : De gauche à droite : potentiel électrostatique observé expérimentalement et champ électrique déduit par calcul du gradient ; distribution de charge par calcul du Laplacien du potentiel ; configuration des électrodes tracées à la pâte à l'argent sur papier Canson noir.

4. ANALOGIES EN THERMIQUE ET EN ÉCOULEMENT DES FLUIDES

Nous ne nous étendons pas sur les analogies entre l'électrostatique, la thermique et

la mécanique des fluides, qui sont introduites dans la plupart des cours classiques d'électrostatique [10 (p. 196)]. Notons cependant que cette analogie permet d'utiliser par exemple des outils de simulation par éléments finis (tels que Modulef, logiciel opensource développé par l'INRIA⁽⁵⁾) développés pour la simulation de problèmes de thermique.

Dans le cas, irréaliste, d'un fluide incompressible et irrotationnel, les équations décrivant l'écoulement sont les mêmes que celles décrivant le potentiel électrostatique, où la vitesse de l'écoulement est équivalent au champ électrique. Ainsi, les données présentées sur la figure 7 (gauche) peuvent aussi être utilisées pour illustrer la distribution de vitesse du fluide autour d'une bille en mouvement (se déplaçant de haut en bas).

En thermique, le potentiel électrostatique est équivalent à la température et le champ électrique est équivalent au flux de chaleur (au signe près). À titre d'exemple, nous présentons ici la résolution d'un problème de thermique simple au moyen de Modulef pour des configurations expérimentales utilisées dans cet exposé.

La méthode des éléments finis est généralement utilisée pour résoudre des problèmes pour lesquels les lois locales sont connues (diffusion de la chaleur, piézo-électricité, mécanique des fluides) mais dont les configurations géométriques sont trop complexes pour permettre une intégration analytique (typique dans les cas pratiques). Le point fondamental de cette méthode est la discrétisation de l'espace en éléments finis géométriquement simples et la résolution du problème global en imposant la continuité de la solution aux nœuds des éléments finis adjacents. Un atout supplémentaire de la méthode est la capacité à définir des éléments complexes intégrant plusieurs variables physiques et donc de résoudre pour une même géométrie un problème intégrant à la fois de la mécanique, de la fluidique et de la thermique. Nous avons ici uniquement utilisé les éléments finis de thermique pour résoudre les problèmes simples spécifiés antérieurement : une électrode formant un angle à 90° à un potentiel fixé et une alternance d'électrodes à deux potentiels différents. Nous présentons (*cf.* figures 8 et 9) le maillage utilisé (*i.e.* la discrétisation de l'espace permettant de résoudre numériquement l'équation différentielle gouvernant la température, *i.e.* le potentiel électrostatique) et la solution sous forme d'équipotentielles. Les fichiers de configuration de Modulef ainsi que les solutions sont disponibles à l'adresse suivante⁽⁶⁾.

CONCLUSION

Nous avons présenté le développement d'un instrument de réalisation simple et peu coûteuse pour la cartographie du champ électrostatique. Outre l'introduction aux méthodes d'instrumentation générales (acquisition de données, contrôle de la table traçante) et en particulier appliquées aux microscopies à sonde locale (balayage de la pointe pour obtenir une cartographie de la variable physique analysée), les résultats sur quelques géométries simples illustrent la validité des théories liées à l'électrostatique enseignées habituellement en premier cycle universitaire, et offrent l'occasion de présenter quelques résultats allant au-delà des résultats analytiques.

(5) Institut national de recherche en informatique et automatique : <http://www-rocq.inria.fr/modulef>

(6) http://friedtj.free.fr/chua/modulef_electrostat.tar.gz

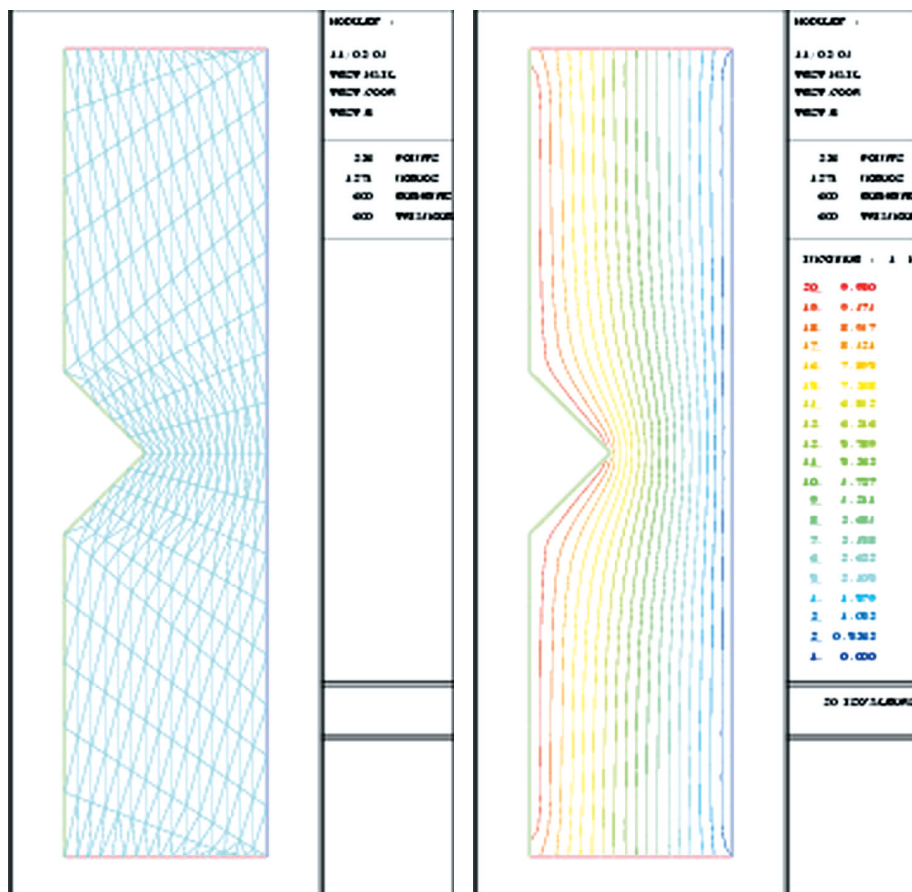


Figure 8 : Résolution par éléments finis du problème de l'électrode présentant un angle à 90° .

Gauche : maillage utilisé pour discrétiser l'espace. Les segments du contour en vert sont à +10 V, le contour en bleu foncé est à la masse, les segments rouges sont à potentiel flottant (non-défini).

Droite : équipotentielles, solutions de la géométrie des électrodes. Les deux lignes de potentiel les plus proches de l'angle, qui entrent en contact avec le bord, présentent une erreur de discrétisation de l'espace (les lignes de potentiels différents ne peuvent théoriquement pas se toucher), erreur qui pourrait être corrigée en affinant la discrétisation autour de ce point critique.

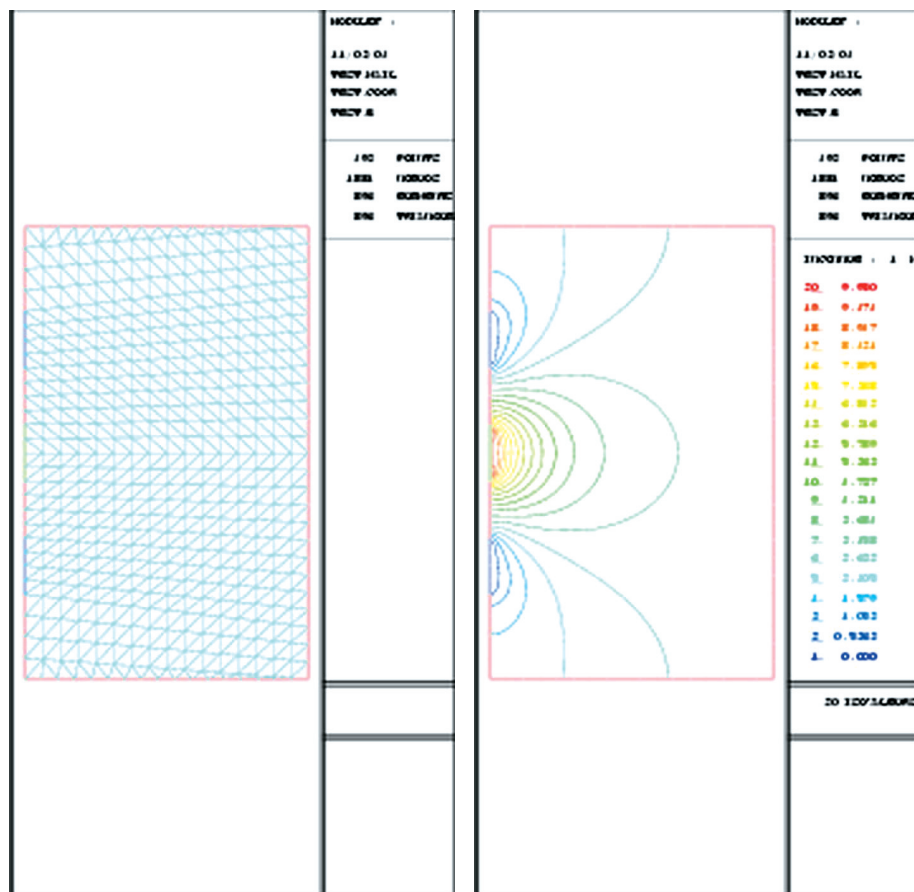


Figure 9 : Résolution par éléments finis du problème de la structure interdigitée.

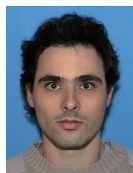
Gauche : maillage utilisé pour discrétiser l'espace. Le contour en vert est à + 10 V, les contours en bleu foncé sont à la masse, les contours rouge sont à potentiel flottant (non-défini).

Droite : isovaleurs du potentiel électrostatique, solutions de la géométrie des électrodes.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] YOUNG R.A. Quantitative experiments in electric and fluid flow field mapping. *Am. J. Phys.*, 2001, **69** (12), p. 1223-1230.
- [2] YOUNG R.A. Electric-field mapping revisited. *Computers in physics*, 1998, **12** (5), p. 432-439.
- [3] VIGNERON J.-P. et GOFFAUX C. Les nouvelles microscopies. *Bull. Un. Phys.*, décembre 2001, vol. 95, n° 839, p. 1811-1825.

- [4] BUTTARD D. La microscopie de champ proche à l'école. *Bull. Un. Phys.*, février 2003, vol. 97, n° 851 (1), p. 261-273.
- [5] FRIEDT J.-M., LE MASNE Q., COQ N. et MYOTTE M. Réalisation d'un profilomètre optique : introduction à la microscopie à sonde locale. *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, février 2004, vol. 98, n° 861, p. 265-277.
- [6] SIMON C. et CHAMBARD J.-P. Réalisation et étude d'un capteur de position pour une séquence d'enseignement du programme de MPI. *Bull. Un. Phys.*, février 2003, vol. 97, n° 851 (1), p. 341-349.
- [7] Electron Microscopy Sciences, P.O. Box 251, Fort Washington, PA. 19034 USA, <http://www.emsdiasum.com>, Conductive silver pen, standard tip, reference 12644-01.
- [8] APPEL W. *Mathématiques pour la physique et les physiciens*. Paris : H&K éditions, 2002.
- [9] VAN GERWEN P. *Microsystems technology for integrated biochemical analysis systems*. Doctorat de l'université catholique de Louvain, 2000.
- [10] FEYNMAN R.P., LEIGHTON R.B. et SANDS M. Le cours de physique de Feynman, électromagnétisme 1. Paris : Interéditions, 1979.
- [11] NILSSON L., GROENING O., KUETTEL O., GROENING P. et SCHLAPBACH L. Microscopic characterization of electron field emission. *J. Vac. Sci. Tech. B*, 2002, **20** (1), p. 326-337.
- [12] JACKSON J.D. *Classical electrodynamics*. Second edition, John Wiley & Sons, 1975.
- [13] GIZELI E. Acoustic transducers, dans *Biomolecular Sensors* Ed. E. Gizeli et C.R. Lowe (Taylor & Francis, London, 2002), p. 183.
- [14] PAESCHKE M., WOLLENBERGER U., KÖHLER C., LISEC T., SCHNAKENBERG U. et HINTSCHE R., Properties of interdigital electrode arrays with different geometries. *Analytica Chimica Acta*, 1995, **305**, p. 126-136
- [15] HINTSCHE R., PAESCHKE M., WOLLENBERGER U., SCHNAKENBERG U., WAGNER B. et LISEC T. Microelectrode arrays and application to biosensing devices. *Biosensors & bioelectronics*, 1994, **9**, p. 697-705.



Jean-Michel FRIEDT
Chercheur post-doctorant
Laboratoire de Microanalyse Nucléaire
Besançon (Doubs)