



HAL
open science

Mesurer, c'est perturber. Application à diverses situations en Électrostatique.

Pedro Llovera, Philippe Molinié, Marcos Dominguez-Lagunilla, Alfredo
Quijano-Lopez

► To cite this version:

Pedro Llovera, Philippe Molinié, Marcos Dominguez-Lagunilla, Alfredo Quijano-Lopez. Mesurer, c'est perturber. Application à diverses situations en Électrostatique.. 12ème conférence de la Société Française d'Electrostatique, LUSAC Cherbourg, Jul 2023, Cherbourg en Cotentin, France. ⟨hal-04205444⟩

HAL Id: hal-04205444

<https://hal.science/hal-04205444v1>

Submitted on 12 Sep 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC0 1.0 - Universal - International License

Mesurer, c'est perturber. Application à diverses situations en Électrostatique.

Pedro Llovera-Segovia^{1,2}, Philippe Molinié³, Marcos Domínguez-Lagunilla¹, Alfredo Quijano-López^{1,2}

¹Instituto Tecnológico de la Energía (ITE) –(Spain),

² Instituto de Tecnología Eléctrica - Universitat Politècnica de València (Spain)

³ Laboratoire de Génie Electrique et Electronique de Paris (GeePs)
Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, CNRS (France)

Résumé — Plusieurs dispositifs peuvent être mis en œuvre pour assurer la mesure de la charge ou de potentiels en Électrostatique. Les équipements commerciaux sont faciles à mettre en œuvre et les bases physiques du problème sont bien établies. Cependant, dans le cas où les potentiels ne sont pas fixés par un circuit extérieur, qui est fréquent en électrostatique, et peut concerner la mesure du potentiel d'une surface isolante chargée comme celui d'un objet conducteur flottant, d'importantes erreurs peuvent provenir de l'influence de l'appareil de mesure ou d'une mauvaise interprétation du résultat de cette mesure.

La spécificité des divers types d'appareils disponibles, moulins à champ, sondes à induction ou sondes asservies au potentiel à mesurer, doit être correctement prise en compte. Ces instruments de mesure créent en effet des conditions aux limites bien spécifiques autour de l'objet étudié, comme la proximité d'un conducteur à la terre, ou une annulation locale du champ électrique. La conversion d'une mesure de champ produit par un conducteur en évaluation de son potentiel nécessite par ailleurs une calibration délicate. Nous présentons ici quelques rappels théoriques, et montrons des exemples concrets de perturbations à prendre en compte pour effectuer des mesures correctes.

Mots-clés — Sonde électrostatique, moulin à champ, mesures électrostatiques

I. INTRODUCTION

La mesure de champ ou de potentiel à l'aide d'appareils fonctionnant sans contact est une pratique courante en Électrostatique. Elle est fondée sur l'influence électrostatique qui relie la charge électrique apparaissant sur un conducteur au champ électrique appliqué sur sa surface. Une mesure de courant permet ainsi de détecter les variations de ce champ.

Deux solutions peuvent alors être envisagées : utiliser un conducteur dont le potentiel est nul, ou asservir le conducteur actif au potentiel de l'objet à mesurer, en annulant le champ électrostatique vu par le conducteur. Elles conduisent à des configurations différentes des lignes de champ et des capacités intervenant dans la détermination du potentiel de l'objet, qui dépend donc de l'appareil de mesure et de sa position, s'il n'est pas fixé par un générateur externe. Par ailleurs on examinera les difficultés rencontrées lors d'une mesure de référence à un potentiel connu en vue d'effectuer ce que nous appellerons ici « calibration », c'est-à-dire le calcul d'un coefficient de proportionnalité permettant de convertir la mesure de champ électrique en potentiel électrostatique. Ces considérations sont illustrées par des simulations numériques.

II. PRINCIPES DE MESURE

Par intégration du courant de fuite $i(t)$ vers une masse à potentiel nul, il est possible de mesurer avec précision la charge induite par un champ électrique $E(t)$ sur une

surface conductrice S connectée à cette masse à travers l'appareil de mesure. Une simple électrode reliée à un circuit intégrateur fournit donc une mesure du champ par la relation :

$$E(t) - E(0) = \frac{1}{s\epsilon_0} \int_0^t i(t) dt \quad (1)$$

Cette intégration peut être réalisée de manière numérique à partir de la valeur du courant instantané, ou de manière analogique par un circuit capacitif, situé dans la boucle de contre-réaction d'un amplificateur opérationnel, de manière à maintenir à un potentiel nul l'électrode de mesure. Une difficulté apparaît cependant, la nécessité d'obtenir une référence de champ nul si on est intéressé à la valeur absolue du champ et non à ses seules variations. Par ailleurs, l'existence de tensions d'offset et de courants de fuite dans l'électronique entraîne nécessairement une dérive de la valeur intégrée de la charge. Une procédure de remise à zéro périodique avec un écrantage garantissant un champ nul est donc nécessaire pour pouvoir mesurer sur le long terme une valeur absolue du champ. C'est cette procédure qui est utilisée dans un moulin à champ dans lequel les dents, à potentiel nul, d'une roue crantée en rotation rapide devant l'électrode active viennent s'interposer périodiquement pour annuler toute influence électrostatique ([1] chap. 11).

Pour faire la mesure sans contact du potentiel d'un conducteur situé au voisinage, les constructeurs proposent une procédure de calibration. Multiplier la distance de l'objet par le champ électrique mesuré ne permet en effet d'obtenir son potentiel que si on est en géométrie plan-plan, ce qui n'est le cas que si la mesure est effectuée de manière rapprochée sur un conducteur dont la grande taille

et si le moulin à champ lui-même est intégré dans un plan de masse suffisamment grand (Fig. 1a). Si la première condition est sur le plan pratique souvent atteignable, la seconde condition est assez contraignante. Si le moulin à champ n'est pas intégré dans un plan de masse, mais isolé dans le champ à mesurer (Fig. 1b), sa présence induit un renforcement du champ.

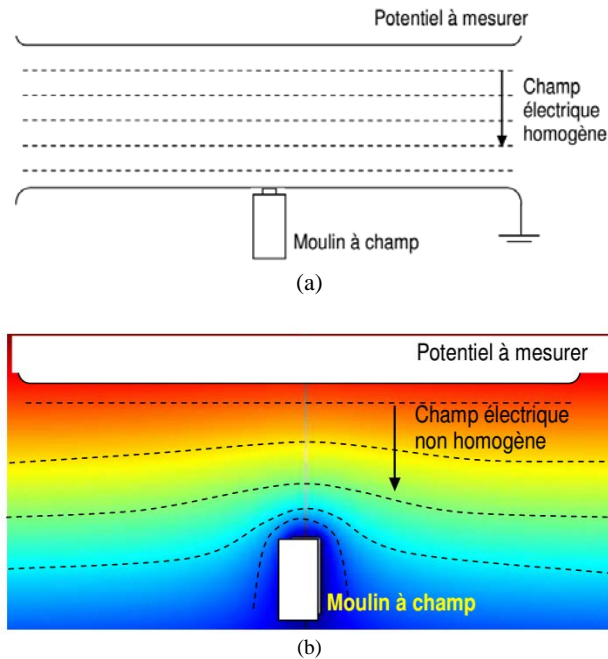


Fig. 1. Moulin à champ dans deux configurations de mesure.
a) intégré dans un plan de masse b) isolé

Les constructeurs peuvent tenir compte de ce renforcement par un calcul réalisé par l'appareil lui-même, la valeur fournie par l'appareil étant fournie en volts. Une lecture de 1kV par exemple sur le cadran d'un appareil de type JCI 140 signifie qu'une surface à 10 cm dans la géométrie de la Fig. 1b serait effectivement à 1kV. Mais la notice de l'appareil précise que cet étalonnage de l'appareil correspond à un champ de $23\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$. L'utilisation d'un tel appareil dans la géométrie de la Fig. 1a, sur laquelle aucune correction n'est nécessaire, avec une électrode à 1kV distante de 10 cm, donnerait une lecture de 435 V sur le cadran. Pour interpréter les mesures d'un moulin à champ, il faut donc tenir compte de la géométrie du problème, ou bien étalonner la mesure en injectant des potentiels connus [2] [3].

Le voltmètre électrostatique est une solution classique à ce problème d'étalonnage. Il permet une mesure directe du potentiel d'une surface au moyen d'une sonde asservie au potentiel à mesurer. Cette technique a été mise en œuvre par William Zisman en 1932, en adaptant un procédé inventé par Kelvin pour mesurer les différences de potentiel de contact entre les matériaux. La mesure du champ est assurée par une électrode vibrante animée par un actionneur piézoélectrique. Cette électrode n'est pas à la masse mais reliée à un générateur dont la tension varie en fonction du champ mesuré. L'asservissement est réalisé de manière à obtenir en permanence une condition de champ nul sur l'électrode active. Le potentiel fourni par le

générateur, qui est connu, est alors égal au potentiel de la région située en face de la sonde ([1] chap.11). Un bon fonctionnement de l'asservissement suppose cependant la proximité d'une surface isolante ou conductrice dont le potentiel est peu influencé par le champ extérieur, c'est-à-dire qui présente une capacité suffisante par rapport à la terre. Par ailleurs le générateur doit évidemment être capable de fournir un potentiel égal à ce qu'il faut mesurer.

Les configurations électrostatiques correspondant au moulin à champ où à la sonde de Kelvin-Zisman asservie en potentiel sont très différentes. Les deux types de mesure perturbent le potentiel de l'objet à étudier, de manière parfois contre intuitive.

III. INFLUENCE DE L'INSTRUMENT DE MESURE

Nous analyserons ici les deux situations de mesure correspondant au moulin à champ et à la sonde électrostatique asservie en potentiel, qui ont déjà été traitées de manière plus complète dans [4]. Nous aborderons ensuite la question de la calibration du moulin à champ dans une situation pratique de mesure.

On considère un conducteur dont la charge Q_0 est fixée dans les trois situations représentées Fig.2.

Dans la première, il est isolé. Son potentiel V_0 est déterminé par sa capacité C_0 par rapport à la terre, représentée ici par un plan en dessous de lui sur la figure, mais en pratique comprend tout son environnement proche (y compris l'expérimentateur, les murs, le plafond de la salle pour une mesure en laboratoire...). Cet environnement est supposé identique dans les deux autres cas, excepté l'appareil de mesure. Dans le cas du conducteur isolé, nous avons donc :

$$V_0 = \frac{Q_0}{C_0} \quad (2)$$

Dans la seconde, le potentiel est mesuré par un moulin à champ. Cet appareil, à potentiel nul, dans l'environnement proche du conducteur va nécessairement augmenter la capacité du conducteur par rapport à la terre. On a alors :

$$V_1 = \frac{Q_0}{C_1 + C'_1} \quad (3)$$

L'augmentation de capacité à la terre, passant de C_0 à $C_1 + C'_1$ entraîne une réduction de potentiel, d'autant plus grande que l'instrument est rapproché du conducteur.

La troisième configuration, pour laquelle la sonde électrostatique est asservie au potentiel à mesurer, peut sembler moins perturbante. Mais elle l'est néanmoins. Si l'asservissement fonctionne, la capacité C'_2 entre le conducteur et la sonde n'interviendra pas dans la détermination du potentiel, mais si la sonde est placée dans une région de l'espace qui était traversée par des lignes de champ reliant le conducteur à la terre, elle va les perturber en réduisant la capacité du conducteur à une valeur C_2 inférieure à C_0

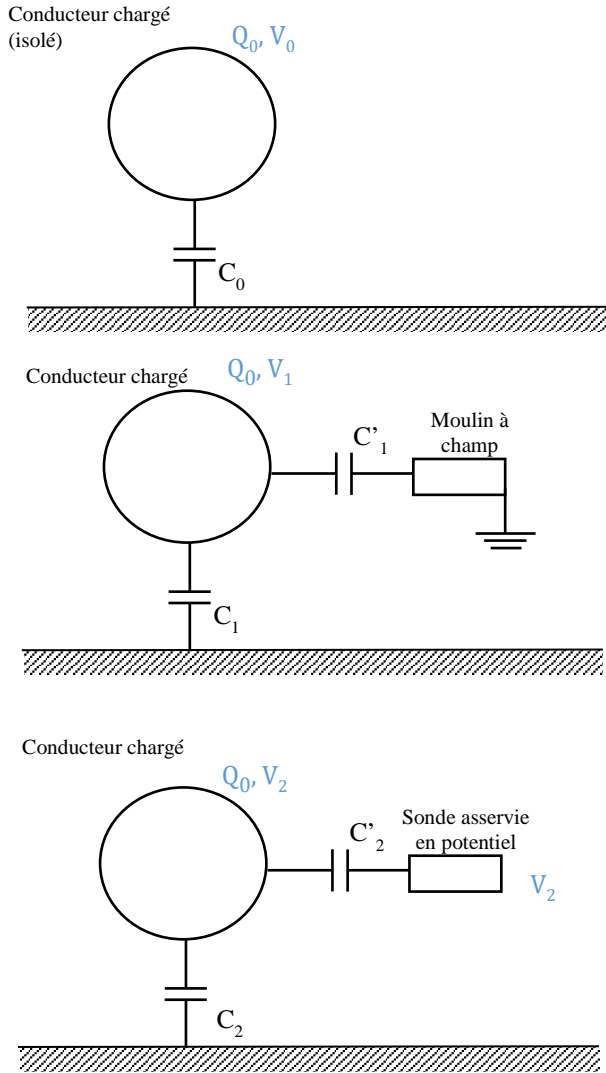


Fig. 2. Conducteur isolé ou en présence d'un instrument de mesure.

Le potentiel du conducteur va alors augmenter :

$$V_2 = \frac{Q_0}{C_2} > V_0 \quad (4)$$

Il faut remarquer que la capacité C'_2 peut être relativement importante, car comme mentionné précédemment, l'asservissement des sondes électrostatiques nécessite une proximité de l'objet à mesurer. La perturbation introduite peut donc être importante [5]. En revanche, elle peut être réduite à zéro si la sonde est située dans une zone où les lignes de champ joignant le conducteur ou le corps étudié aux masses environnantes sont pratiquement absentes, c'est ce type de configuration qui est généralement utilisé pour les mesures de potentiel de surface, qu'on peut alors considérer comme non perturbatrices [6].

Dans de nombreux cas pratiques, seul le moulin à champ peut être utilisé. C'est le cas par exemple si le potentiel à mesurer est hors d'atteinte d'un voltmètre électrostatique, ou si les capacités du système à mesurer sont trop faibles pour permettre un asservissement

convenable. Dans ce cas, assurer une perturbation nulle peut être réalisé en intégrant le moulin à champ dans un plan de masse existant. Mais même dans ce cas une calibration sera généralement nécessaire pour avoir accès au potentiel réel du conducteur étudié. Or, cette calibration pose également un problème car il faut faire la mesure de champ tout en maintenant le conducteur à un potentiel connu. Cela ne peut pas se faire sans perturber les capacités du système. Sur la Fig. 3 deux cas sont représentés, suivant que le conducteur est connecté au générateur de tension par un conducteur nu ou par un câble coaxial muni d'un écran à la terre.

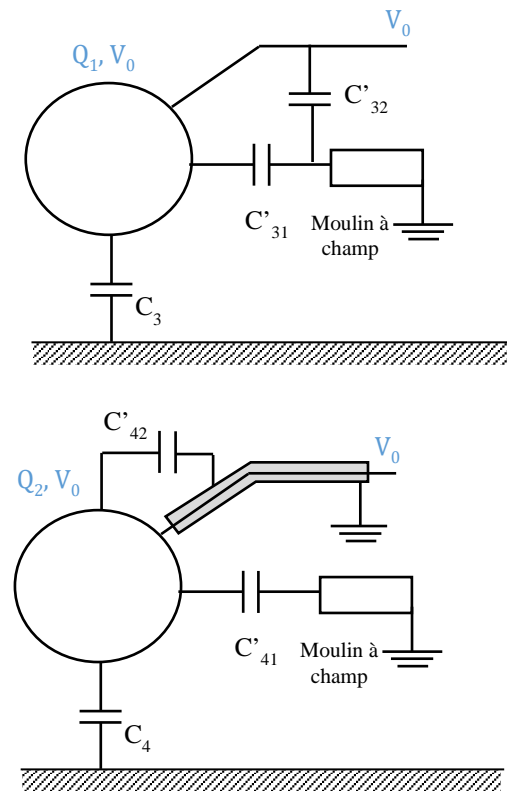


Fig. 3. Calibration de la mesure au moulin à champ en connectant le conducteur à un générateur de tension par un fil nu ou un câble coaxial muni d'un écran à la masse.

Dans le premier cas, le fil d'alimentation entraîne plusieurs perturbations. Premièrement, le fil réduit la capacité propre de la sphère ($C_3 < C_0$) s'il traverse une zone où des lignes de champ la relient à la masse. La charge de la sphère pour un même potentiel V_0 sera donc plus faible ($Q_1 < Q_0$), ce qui entraînera une baisse de potentiel lorsque le fil sera débranché et éloigné de la sphère. Mais cela n'aura pas de conséquence sur la calibration si elle est réalisée lorsque le fil est branché.

En revanche l'influence directe du fil d'alimentation sur le moulin à champ perturbe la mesure de deux manières : d'une part, la capacité C'_{32} augmente le signal vu par le moulin à champ d'un facteur $(C'_{31} + C'_{32})/C'_{31}$, ce qui entraînera une sous-estimation du potentiel. D'autre part la capacité C'_{31} est réduite par la présence du fil, par

rapport à celle intervenant avec la sphère seule (C'_1). On peut réduire ces effets en positionnant le moulin à champ le plus à l'abri possible de l'influence du fil d'alimentation.

Le second cas représenté Fig. 3 correspond à l'utilisation d'un câble coaxial muni d'un écran à la masse pour alimenter le conducteur. Dans ce cas la perturbation exercée directement par le fil d'alimentation sur le moulin à champ disparaît. La capacité entre la sphère et la masse, et donc sa charge à potentiel constant, sont alors nettement augmentées par l'introduction de la capacité (C'_{42}) avec l'écran du câble, surtout si l'écran à la masse en est proche ($Q_2 \gg Q_0$). Le fait de retirer le câble provoquera une importante augmentation du potentiel de la sphère, mais si la calibration est effectuée pendant la charge à V_0 , cet effet d'augmentation de capacité ne la perturbera pas. En revanche, l'écran capte une partie des lignes de champ issues de la sphère qui, en son absence, auraient participé à la capacité avec le moulin à champ. Il réduit donc cette capacité ($C'_{41} < C'_1$), ce qui diminue la charge induite sur le moulin à champ pendant la calibration, et conduit à une surestimation des potentiels mesurés.

IV. APPLICATION A UNE SPHERE CHARGEE

Nous avons procédé à l'aide du logiciel COMSOL® à des simulations par éléments finis des situations précédentes pour un conducteur sphérique de rayon 10 cm ou 1 m positionné dans une boîte cylindrique de 10 m de diamètre et de 10 m de hauteur (Fig. 4).

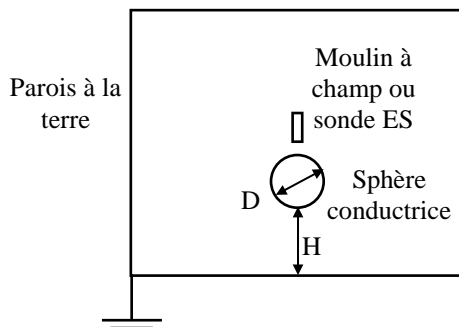


Fig. 4. Configuration choisie pour la simulation

A. Calcul numérique de l'influence de l'appareil de mesure sur le potentiel d'un conducteur de charge connue.

Nous avons calculé le potentiel d'un conducteur isolé porteur d'une charge de 100 nC, pour diverses hauteurs H du conducteur au-dessus de la terre (entre 10 cm et 4 m), avec et sans la présence d'un instrument de mesure. Le moulin à champ est modélisé par un cylindre à la terre de 8 cm de diamètre et de 14 cm de hauteur, placé 10 cm au-dessus de la sphère, selon la Fig. 4.

Les résultats sont donnés Fig. 5. Le potentiel de la sphère est systématiquement plus faible lorsque le moulin à champ est positionné à proximité, mais cet effet est nettement plus accentué dans le cas de la petite sphère,

dont la capacité propre est plus faible. Dans ce cas, la baisse de potentiel entraînée par la présence de l'appareil de mesure peut atteindre 1000 V (presque 15%) pour un potentiel en l'absence d'appareil de 8572 V. L'influence du moulin à champ est nettement plus réduite pour la sphère de 1 m de diamètre, pour laquelle la perte n'est que de 9 V (2,2%) lorsqu'elle est proche de la terre.

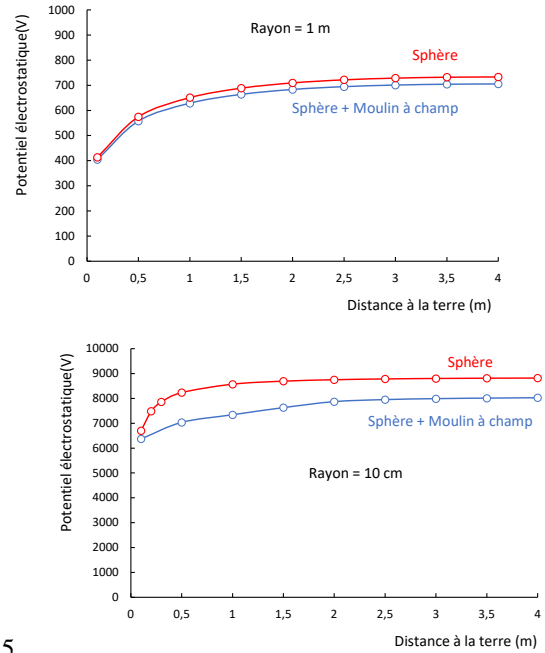


Fig. 5.

Potentiel de sphères chargées à 100nC, seules et en présence d'un moulin à champ proche de leur surface, fonction de la distance à la masse des sphères.

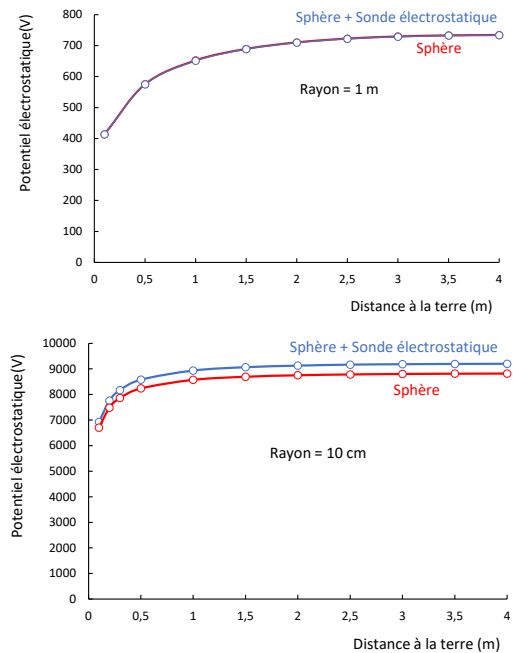


Fig. 6. Potentiel de sphères chargées à 100nC, seules et en présence d'une sonde électrostatique proche de leur surface, fonction de la distance à la masse des sphères.

La même simulation peut être effectuée avec une sonde électrostatique asservie au potentiel de la sphère. Nous avons supposé que cette sonde (un cylindre de 1 cm

de rayon et de 10 cm de longueur) est placée à 0,5 cm au-dessus de la sphère. Les résultats en sont donnés Fig. 6. Nous constatons que le potentiel des sphères est effectivement plus élevé en présence de la sonde électrostatique. La perturbation est plus faible que dans le cas précédent. Elle est quasiment négligeable (0,08%) dans le cas de la sphère de 1 m, ce qui est logique, très peu de lignes de champ partant dans ce cas de la partie supérieure de la sphère. Dans le cas de la petite sphère, elle représente tout de même une augmentation de 381 V pour un potentiel de 8818 V pour la sphère seule, soit une augmentation de 4,2 %. Cette perturbation n'est plus négligeable.

B. Calcul numérique des erreurs de calibration induites par l'influence du fil ou du câble connectant le conducteur

Nous considérons ici une sphère chargée via un fil conducteur à un potentiel de 5 kV, la position du fil d'alimentation pouvant présenter les trois positions représentées Fig. 7. La distance entre la surface inférieure de la sphère et la masse est fixée à 3 m pour toutes les simulations. Nous supposons ici que le moulin à champ ne perturbe pas les potentiels, en étant intégré dans un des deux conducteurs, soit le plan de masse, soit dans la sphère elle-même. Le fil d'alimentation peut, comme dans la partie précédente, être nu ou intégré dans un câble coaxial dont l'écran est à la masse.

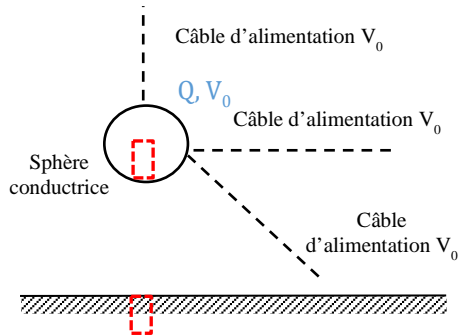


Fig. 7. Configuration correspondant aux simulations de la calibration, représentant 3 positions possibles pour le fil d'alimentation, et 2 positions pour le moulin à champ.

Les résultats de la simulation sont donnés dans les Tables I et II respectivement pour un fil nu et intégré dans un câble coaxial muni d'un écran de masse. Il est clair que le champ électrique mesuré dépend considérablement de la position de ce fil. Avec le fil nu et la petite sphère, le champ électrique mesuré par le moulin à champ situé dans le plan de masse peut être jusqu'à 4 fois plus important que le champ mesuré avec la sphère seule. Il faut souligner que l'augmentation du champ reste très importante (d'un facteur de l'ordre de 2,5) lorsque le fil d'alimentation est situé derrière la sphère. Ce n'est pas intuitif.

Avec la grande sphère, les différences se réduisent considérablement, à 10 % au maximum, mais restent importantes.

Table I
Champ électrique (V/m) calculé pour les 2 positions du moulin à champ, pour la sphère seule et pour les 3 positions du fil nu polarisant la sphère à 5kV.

	Rayon = 1m		Rayon = 10 cm	
	côté masse	côté sphère	côté masse	côté sphère
	1347.0	6844.5	111.5	53246
	1362.7	6698.6	264.2	42723
	1344.6	6682.2	205.3	43415
	1471.4	6481.4	438.1	37974

Table II
Champ électrique (V/m) calculé pour les 2 positions du moulin à champ, pour la sphère seule et pour les 3 positions du câble écranté polarisant la sphère à 5kV.

	Rayon = 1m		Rayon = 10 cm	
	côté masse	côté sphère	côté masse	côté sphère
	1347.0	6844.5	111.5	53246
	1318.6	6829.6	92.6	53448
	1330.9	6721.8	97.2	49860
	1284.1	7070.8	83.9	60864

(NB : la réalisation du maillage a une influence sur les résultats. Une différence inférieure à 10 V.m⁻¹ n'est pas significative dans ces tableaux)

L'utilisation d'un câble coaxial réduit cette influence respectivement à 20 % au maximum pour la petite sphère et à 7 % pour la grande. Cette perturbation qui reste importante confirme que la modification de capacité entre moulin à champ et sphère liée à la présence du coaxial doit être prise en compte pour une mesure précise.

La Fig. 8 illustre les problèmes de calibration liés à un mauvais positionnement du fil d'alimentation. On considère ici une sphère de 10 cm de rayon chargée à 5 kV au moyen d'un fil nu horizontal. Le moulin à champ est intégré dans le plan de masse à la verticale de la sphère. Le cas A correspond au cas d'une mesure sur la sphère seule. Le champ électrique calculé par la simulation a

éléments finis sur l'appareil de mesure est de 111,5 V/m, correspondant à une charge totale de la sphère de 56 nC. Dans la situation B, le champ électrique mesuré par l'appareil est 264,2 V/m (2,4 fois plus élevé) et la charge sur la sphère est de 45 nC. C'est généralement cette position qui est utilisée pour calibrer la relation entre le champ électrique et le potentiel de l'objet. Mais elle conduirait ici à sous-estimer le potentiel d'un facteur 2,4 ! En effet, la mesure sur la situation C après une calibration à 5 kV dans la situation B conduirait à une lecture de 1,7 kV au lieu de 4,1 kV.

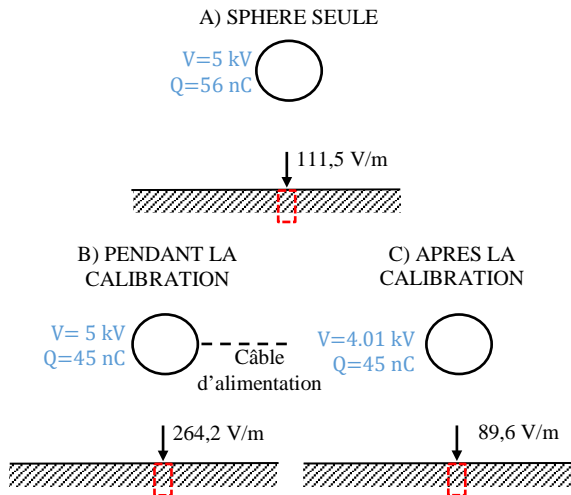


Fig. 8. Comparaison du champ produit par une sphère seule chargée à 5000V avec celui produit dans le processus de calibration en y ajoutant un fil d'alimentation horizontal.

Dans ce cas, il est plus indiqué d'effectuer la calibration dans la situation C, après le retrait du fil d'alimentation. Si on suppose que la séparation se fait sans transfert de charge, le potentiel en situation C, qui chute proportionnellement à l'augmentation de capacité (de C_3 sur la Fig. 3 à C_0 sur la Fig. 2) serait ici de 4,01kV. La calibration dans cette situation conduirait à une surestimation de 25% du potentiel de la sphère.

Si un câble coaxial écrané est utilisé, le champ mesuré en B est plus proche du champ en A (92,6 V/m), par contre le calcul de notre simulation montre que la charge portée par la sphère est nettement plus importante (102,5 nC), à cause de la présence de la capacité entre sphère et écran (C'_{42} sur la Fig. 3). Le potentiel en situation C, après retrait du câble, sera alors de 9,15 kV. Dans ce cas, si la calibration est effectuée sur la situation B, la mesure en situation C donnerait une évaluation de 11,05 kV (surestimation du potentiel de 20,7 %) alors que si la calibration à 5kV était effectuée en situation C, la mesure conduirait à sous-estimer le potentiel d'un facteur 2,2. Dans cette configuration il faut donc effectuer la calibration avec le câble branché, mais l'erreur reste importante.

V. CONCLUSION

L'étude présentée ici montre que l'influence des instruments de mesure sur les champs et les potentiels électrostatiques qu'ils sont censés quantifier n'est jamais nulle, et rarement négligeable. Il importe de la quantifier. La calibration notamment pose des problèmes délicats. Elle peut faire l'objet d'une modélisation 3D par éléments finis [7], mais il ressort de notre étude quelques remarques de bon sens sur le positionnement des appareils.

Les moulins à champ doivent être intégrés si possible dans un plan de masse, en gardant à l'esprit que, même positionnés face à un conducteur plan, à la distance préconisée par le constructeur, une correction doit être appliquée au potentiel indiqué par l'appareil, qui tient compte du renforcement du champ provoqué par l'appareil isolé. En général une calibration est souhaitable.

L'utilisation d'une sonde de potentiel, quand elle est possible, évite la nécessité de cette calibration, et conduit à des perturbations nettement moindres que celle des moulins à champ, à condition qu'elle s'interpose le moins possible dans les lignes de champ. On peut dire la même chose du câble d'alimentation utilisé pour la calibration. Il faut qu'il soit le plus possible éloigné de l'appareil de mesure, et écrané par le conducteur à étudier.

Dans tous les cas, même si les lois de l'Electrostatique sont une composante ancienne de la physique, et même dans des situations ne nécessitant pas de recourir aux subtilités de la physique quantique, il faut garder constamment à l'esprit que mesurer, c'est toujours perturber.

REFERENCES

- [1] J.S. Chang, A.J. Kelly, J.M. Crowley, "Handbook of Electrostatic Processes", Marcel Dekker Inc., New York, 1995.
- [2] J. N. Chubb. "Calibration of instruments for electrostatic measurements". IEE Colloquium on Significance of Calibration, 1993.
- [3] P. Llovera, P. Molinié, A. Soria, A. Quijano. "Measurements of electrostatic potentials and electric fields in some industrial applications: Basic principles." Journal of Electrostatics N° 67 pp. 457-46, 2009.
- [4] R. Kacprzyk. "Measurements of Electrical Potential of Constant Charge Objects". IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 19, No. 1; pp. 134-139, 2012.
- [5] M. N. Horenstein. "Measuring Isolated Surface Charge with a Noncontacting Voltmeter". Journal of Electrostatics N° 35, pp. 203-213, 1995.
- [6] P. Molinié, P. Llovera. "Surface potential measurements: implementation and interpretation". 2000 Eighth International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications (IEE Conf. Publ. No. 473) pp. 253-258, 2000.
- [7] T. Takuma, M. Yashima, T. Kawamoto, "Principle of surface charge measurement for thick insulating specimens", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 5 N°4, pp. 497-504, 1998.