

Distribution de champ dans des jonctions de câbles HVDC en situation instationnaire

Thi Thu Nga VU^{1*}, Gilbert TEYSSÉDRE^{2*}, Séverine LE ROY², Tùng Trần ANH¹, Thanh Sơn TRẦN¹

¹Electrical Engineering Department, Electric Power University, Hanoi, Vietnam

²Laplace, CNRS and University of Toulouse, Toulouse, France

RESUME - L'objectif de ce travail est de prédire les distributions de champ électrique dans des jonctions de câbles, en mettant l'accent sur l'évolution des points de renforcement de champ dans des conditions instationnaires du point de vue électrique et thermique. L'effet des inversions de polarité y est discuté, de même qu'une comparaison de la criticité entre des situations de température homogène et avec gradient thermique.

Mots-clés—HVDC; jonctions, multidiélectriques, modélisation.

1. INTRODUCTION

La transmission d'énergie, sous haute tension continue (HVDC) est en plein essor actuellement grâce à la flexibilité apportée par les nouvelles générations de convertisseurs de puissance et à la nécessité d'acheminer l'énergie de zones de production décentralisées vers les sites de consommation, que ce soit par liaison terrestre, sous-marine, mais aussi pour des projets de réseau d'énergie à grande échelle [1]. Les matériaux utilisés pour l'isolation électrique dans les composants correspondants, à savoir les câbles, les convertisseurs, les traversées, etc., ont des exigences spécifiques, car la répartition du champ électrique n'est pas régie de la même manière que sous contrainte AC. Sous HVDC, la distribution de champ est résistive en régime stationnaire après le passage par un régime transitoire au cours duquel les charges d'espace s'établissent [2]. Anticiper la répartition du champ est donc plus compliqué qu'en AC, d'autant plus que les matériaux polymères utilisés dans les systèmes d'isolation électrique ont une dépendance en température de la conductivité électrique substantielle et ont des propriétés non-linéaires en champ dans une plage de champ (au-dessus de ≈ 10 kV/mm) correspondant aux champs de service [3]. En outre, ils subissent un piégeage de la charge qui rend encore plus incertaine la prédiction des distributions de champ. Les conséquences de telles caractéristiques sont :

- un renforcement local du champ électrique, représentant les points faibles possibles du matériau avec rupture prématurée;
- l'implication possible des charges électriques accumulées dans le vieillissement à long terme des matériaux.

Répondre aux problèmes et fiabiliser les liaisons par câbles nécessite des recherches sous divers aspects: i/ le développement de matériaux offrant de meilleures performances pour les applications ciblées; ii/ le développement de modèles physiques pour rendre compte de la génération, du stockage et du transport de charges; iii/ le développement de techniques, en particulier

pour la mesure de la répartition de charge, pertinentes pour la géométrie et les contraintes thermiques et électriques rencontrées; iv/ l'établissement de méthodologies et de critères d'évaluation des matériaux isolants pour ces applications; v/ la mise en œuvre de modèles d'ingénierie pour l'estimation de la distribution de contraintes.

Dans cette contribution, nous nous intéressons principalement à la modélisation du champ électrique, dans des situations instationnaires du point de vue électrique et thermique dans des accessoires de câbles comportant une association d'isolants de différente nature et des géométries particulières. Dans de nombreuses situations, des simulations ont été réalisées sur des objets certes complexes, mais en situation stationnaire [4]. On peut se poser la question de la redistribution du champ électrique dans le cas où la puissance transmise augmente soudainement, impliquant d'avoir un transitoire thermique dans l'accessoire, et également avoir une idée du temps de mise en équilibre thermique de l'objet. Le transitoire vis-à-vis de la contrainte électrique fait évidemment intervenir le passage d'une distribution capacitive à une distribution résistive du champ électrique à la mise sous tension, avec une constante de temps 'électrique' dépendant de la température. Il s'agit également d'estimer les valeurs de champ maximum que l'on peut obtenir lors des manœuvres, notamment s'agissant d'une inversion de la polarité de la tension appliquée (inversion du flux de puissance dans des lignes utilisant des convertisseurs LCC). L'objectif est d'anticiper les points chauds de la contrainte électrique au cours de manœuvres sur le dispositif, comme ces inversions de polarité ou les variations de température liées aux fluctuations de puissance transportée. De plus, des tests 'type' et de pré-qualification, à 1.85 U_o et 1.45 U_o et impliquant des variations du courant sur plusieurs heures ainsi que des inversions de polarité sont pratiqués, ainsi que des essais en impulsionnels et doivent être pris en compte dans le design [5] [6].

2. OBJET D'ETUDE ET MODELE DEVELOPPE

Les jonctions de câbles sont principalement de deux types pour les isolations extrudées [7]. Les joints 'usine' s'appliquent plutôt pour des câbles sous-marins, et sont élaborés au moment de l'extrusion, par exemple pour les besoins de maintenance des lignes de production après plusieurs dizaines de km. Ils sont compacts et reforment le câble quasiment à l'identique ; les matériaux/procédés utilisés étant les mêmes que ceux de l'isolant de câble. Les joints préfabriqués – ou pré-moulés sont quant à eux réalisés en utilisant un matériau différent de celui de l'isolant

du câble. Il s'agit généralement de silicones ou d'élastomère EPDM (terpolymère ethylene-propylene-diene monomer). Ils sont manufacturés à la pose des câbles, en particulier pour les câbles enfouis à la jonction de sections de câbles de longueur limitée pour des questions de logistique. La reconstruction de l'isolation et de toutes les composantes du câble prend plus d'espace que pour les jonctions d'usine. Quelle que soit sa construction, une jonction, comme une terminaison de câble [8] représente un point faible du système de transmission, et l'exposition aux défaillances augmente avec les montées en tension envisagées. Evidemment le nombre de jonctions s'accroît avec le développement de lignes de plus en plus longues. Par exemple, pour la ligne HVDC France-Italie Piémont Savoie (320 kV, 1200 MW), avec 190 km de câble souterrain sur 2 lignes, ce sont environ 160 jonctions qui sont réalisées pour assembler les tronçons de câbles.

2.1. Géométrie

L'objet de la présente étude est une jonction HVDC 200 kV, 1 kA dont la géométrie type [9] a été fournie par SileCable (Figure 1). Elle est constituée d'un conducteur cuivre, d'un isolant du câble en polyéthylène réticulé (XLPE), d'un matériau de raccordement (EPDM) et de diverses couches de matériau semi-conducteur (polymère chargé au noir de carbone). Des cônes répartiteurs de champ sont présents aux deux extrémités de la jonction. Dans le modèle décrit ici, la couche externe est simplifiée par une couche semi-conductrice assurant la continuité électrique et amenant une résistance thermique en surface de la jonction.

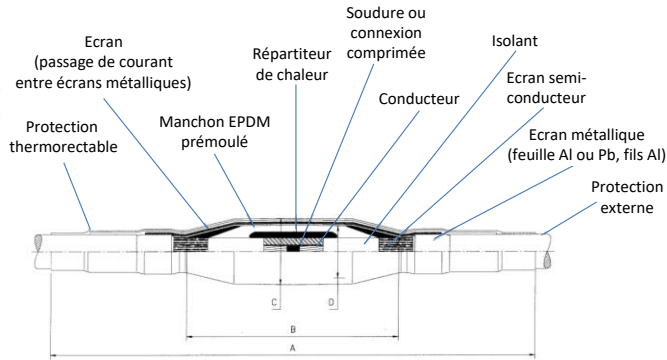


Fig. 1. Schéma de l'objet simulé.

2.2. Matériaux

Les données sur les matériaux sont pour partie issues d'une étude expérimentale [3], [10] touchant en particulier à la conductivité électrique des divers isolants. L'équation générale suivante a été paramétrée, cf. Tableau 1, par l'ajustement de données expérimentales de courant fonction du champ obtenues sur échantillons plans.

$$\sigma(T, E) = A \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{k_B T}\right) \cdot \sinh(B(T) \cdot E) \cdot E^\alpha \quad (1)$$

La Figure 2 montre une comparaison de caractéristiques courants quasi-stationnaires fonction du champ pour les deux matériaux à des températures différentes. Le courant – donc la conductivité – est tantôt supérieur dans un matériau ou l'autre, selon les conditions de champ et de température, ce qui aura pour conséquence de produire un report du champ DC dans l'un ou l'autre des matériaux selon ces mêmes conditions.

Les autres grandeurs physiques utilisées dans le modèle sont reportées au Tableau 2. L'apport de chaleur par effet Joule dans le câble conducteur cuivre est fait en prenant en compte une

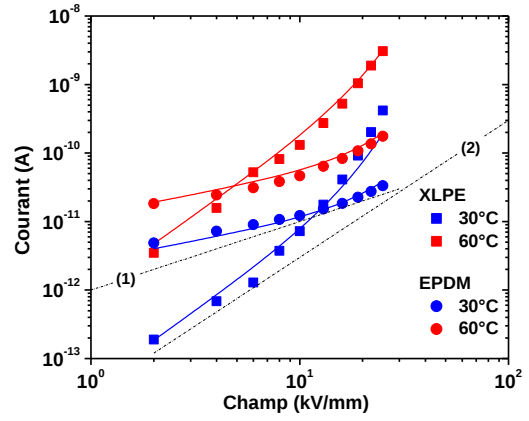


Fig. 2. Caractéristiques courant-champ des matériaux isolants utilisés.

Tableau 1. Paramètres de l'équation de conductivité utilisée pour les deux matériaux isolants. Dans l'Eq. 1, $B(T)=aT+b$. La conductivité est donnée en S/m, le champ en V/m, la température en K.

	XLPE	EPDM
A (S.I.)	0.8	97
E_a (eV)	1.0	0.44
a (mV/K)	0 (T < 313 K); -1.3×10 ⁻⁹ (T ≥ 313 K)	4.8×10 ⁻¹⁰
b (mV)	1.38×10 ⁻⁷ (T < 313 K); 5.45×10 ⁻⁷ (T ≥ 313 K)	-5.1×10 ⁻⁸
α	0.15	-1.42

Tableau 2. Autres données matériaux utilisées dans le domaine.

	XLPE	EPDM	Semicon
Permittivité relative ϵ_r	2.3	2.9	--
Cond. thermique λ (W/m/K)	0.38	0.30	0.34
Masse volumique ρ_m , (kg/m ³)	930	1200	
Chaleur spécifique c_p (J/g/K)	1900	730	
Cond. électrique σ (S/m)	Cf. Tableau 1		6.0×10 ³

résistivité de référence du cuivre de $1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ à 20°C et un coefficient de température pour la résistivité de $3.9 \times 10^{-3} K^{-1}$.

2.3. Modèle thermique-électrique

La résolution a été réalisée au moyen de l'outil Comsol® en utilisant les modules thermique et électrique. Les équations générales à résoudre sont les suivantes:

-Equation de Maxwell réduite au cas DC [6]:

$$-\nabla \cdot (\epsilon \nabla V) - \nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0 \quad (2)$$

qui devient sous forme locale et en milieu continu, l'équation de continuité:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla J = 0 \quad (3)$$

-Equation de dynamique thermique :

$$\rho_m c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla (\lambda \nabla T) = Q \quad (4)$$

Où ρ_m est la masse volumique, c_p la chaleur spécifique, λ la conductivité thermique, Q la source de chaleur.

La contrainte électrique en tension est appliquée sur le conducteur. Nous avons considéré une tension nominale appliquée au conducteur de 200 kV. La distribution en champ électrique est calculée dans des conditions instationnaires avec

mise sous tension de 24 h, mise en court-circuit, et au cours d'inversions de polarité. Le passage d'une polarité à une autre se fait avec une mise en court-circuit intermédiaire de 3min. Une durée de 24 h a été choisie pour approcher d'une situation stationnaire à la fois du point de vue thermique et électrique.

La modélisation thermique est réalisée en considérant un apport de chaleur par effet Joule dans le conducteur et une perte extérieure par des phénomènes de convection dans l'air. La section de conducteur considérée est de 50 mm². La puissance produite dans le conducteur est de l'ordre de 350 W/m sous 1 kA à 20°C. L'échange de chaleur avec le milieu ambiant est supposé se produire par convection naturelle:

$$q_c = h(T_s - T_{amb}) \quad (5)$$

où h représente le coefficient de transfert convectif, relié au nombre de Nusselt (h de l'ordre de 5 W/m²/K en prenant en compte la géométrie du câble est déterminé rigoureusement dans le logiciel de résolution). T_s et T_{amb} sont respectivement la température de surface et la température ambiante. Le flux de chaleur échangé par rayonnement (qui reste faible dans nos conditions thermiques) est également pris en compte en considérant un coefficient d'émissivité de surface de 0.8.

3. RESULTATS

La Figure 3 montre les dimensions de l'objet modélisé, de rayon 92 mm. Pour les représentations radiales sous forme de profils, nous avons choisi une position à z=800 mm, soit à mi-distance entre le cône déflecteur et le semi-conducteur interne. La distribution axiale du champ est prise à l'interface entre l'isolant XLPE et le matériau de raccordement : cela peut constituer un point faible de la jonction.

Les contraintes appliquées sont celles décrites précédemment (+/-200 kV). Nous allons considérer trois conditions thermiques : une condition homogène à T=30°C, une condition stationnaire avec gradient thermique dû à l'injection d'un courant de 1 kA, et une condition instationnaire à la fois du point de vue électrique et thermique avec le même courant.

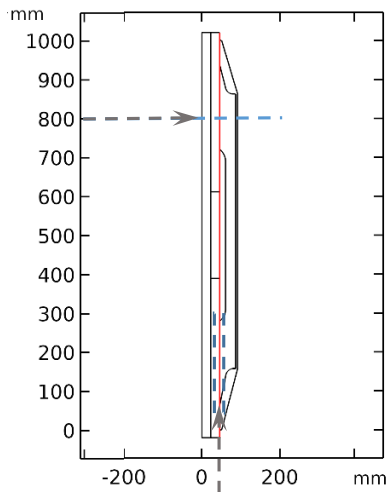


Fig. 3. Dimensions de la jonction et position des profils réalisés indiquées par des flèches: Radialement à une position z=800mm à mi-distance entre les déflecteurs semicon; axialement: à l'interface entre les deux isolants.

3.1. Simulation thermique

La modélisation thermique a été réalisée en supposant qu'à l'origine la jonction est à une température isotherme de 20°C. A t=0 s, un courant de 1 kA est imposé au conducteur ce qui a pour

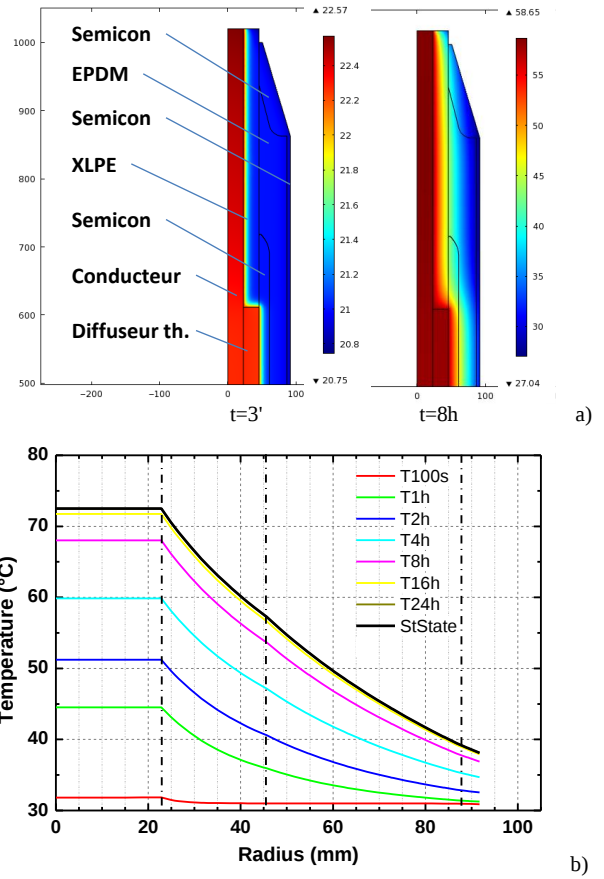


Fig. 4. a) Cartographies de distribution de température dans la jonction à différents temps après établissement du courant b) Distribution radiale à différents temps et solution stationnaire. prise à z=800 mm. Les lignes verticales indiquent les limites des isolants.

effet d'échauffer lentement la jonction et de produire un gradient thermique au sein de l'isolant. Le gradient de température final est de l'ordre de 40°C, avec un maximum de température situé entre l'extrémité du tube semi-conducteur de raccordement interne et l'extrémité de la jonction. La Figure 4a) présente la distribution en température dans la jonction après 3 min et 8 h d'échauffement, alors que la Figure 4b) présente l'évolution de la température en fonction du temps d'échauffement pour une coupe à z=800 mm. Le profil de température issu d'une résolution en condition stationnaire est également représenté. On peut voir que l'établissement d'un régime stationnaire nécessite plusieurs heures. Au bout de 16 h, l'équilibre thermique n'est pas complètement atteint. L'interface entre les deux isolants est peu marquée car les conductivités thermiques sont proches.

3.2. Modélisation électrique

Des exemples de distributions de champ électrique obtenues pour cette même jonction sont représentés à la Figure 5. La tension est considérée appliquée à l'instant où le courant est appliqué sur le conducteur. On peut remarquer qu'au cours du temps, un effet de lissage du champ se produit. Le champ maximum, situé dans la région sous le cône répartiteur de champ, est de 16 kV/mm après 3 min et devient 14 kV/mm au bout de 8 h de polarisation. Ceci est en partie lié au fait que les zones de champ géométrique renforcé sont également celles qui ont la température la plus élevée : l'augmentation de température provoque une augmentation de la conductivité électrique et reporte le champ dans des zones plus froides. A la remise à zéro de la tension, un champ résiduel de l'ordre de 6 kV/mm est présent. Après inversion de polarité, le champ est très nettement augmenté localement, de l'ordre de 18 kV/mm : la charge accumulée nécessite un temps de relaxation relativement long

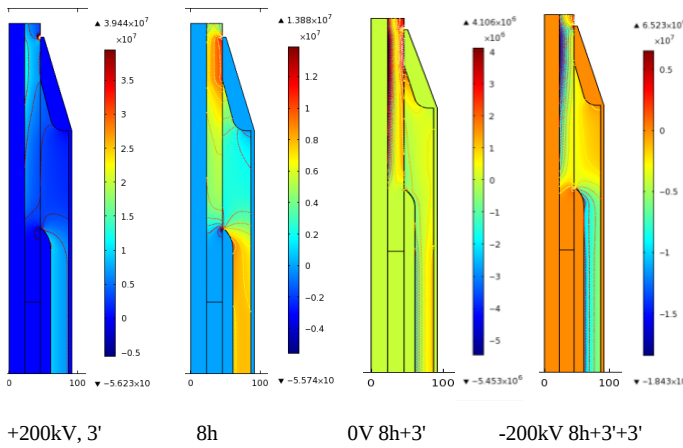
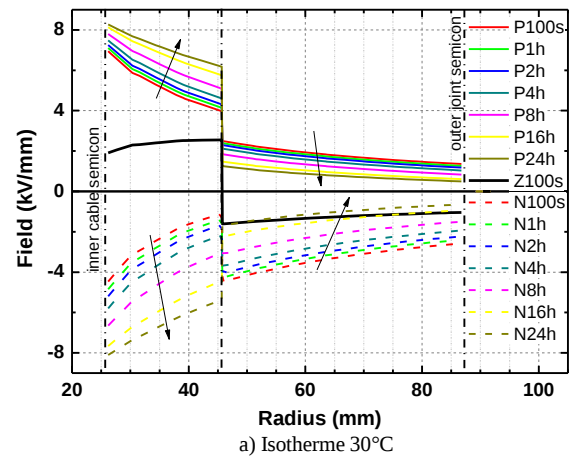


Fig. 5. Quelques exemples de cartographies de champ dans la jonction après application d'un courant de 1 kA et tension de +200 kV ($t=0$) basculé à -200 kV à 8 h+10 s. Champ au bout de 3', 8 h, 3' après remise à zéro et 3' après inversion de polarité.

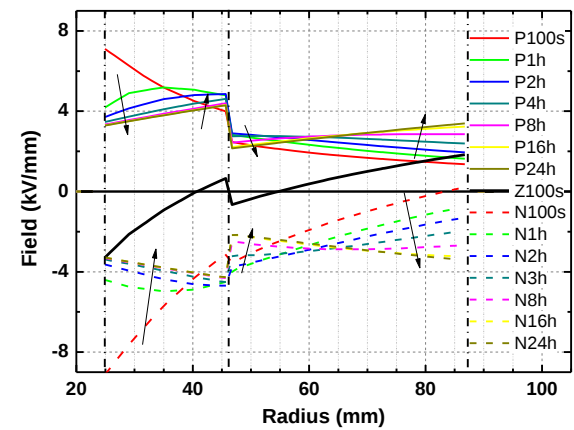
pour être dissipée. L'objectif est de suivre de manière temporelle l'évolution de la position des points de renforcement de champ.

De façon à dissocier les effets thermiques des effets non linéaires en champ, nous avons considéré les distributions de champ obtenues de manière transitoire, sous une tension de 200kV pendant 24h, suivie d'une inversion de polarité et à nouveau d'une mise sous contrainte pendant 24 h, et ce pour 3 conditions thermiques différentes: une isotherme à 30°C, une condition de gradient thermique stationnaire (courant de 1 kA préétabli), et enfin le cas illustré précédemment où les contrainte électrique et thermique sont appliquées simultanément. Les résultats obtenus pour la distribution radiale du champ à la position $z=800$ mm sont représentés à la Figure 6 (la composante axiale du champ est quasiment nulle à cette position). La distribution de champ dans des conditions isothermes se distingue nettement des autres cas. La distribution de champ, initiale capacitive ($E_{XLPE} > E_{EPDM}$), évolue progressivement avec un renforcement du champ plus important dans le XLPE, sans changement prononcé de la forme générale. Cette évolution répond à deux phénomènes : d'une part la conséquence du fait que la résistivité à 30°C du XLPE est supérieure à celle de l'EPDM, pour des champs < 10 kV/mm, cf. Figure 2. L'autre aspect est que les champs dans cette région restent modérés de sorte que les phénomènes non linéaires, tendant à une homogénéisation du champ au cours du temps, sont tout juste perceptibles dans les deux matériaux.

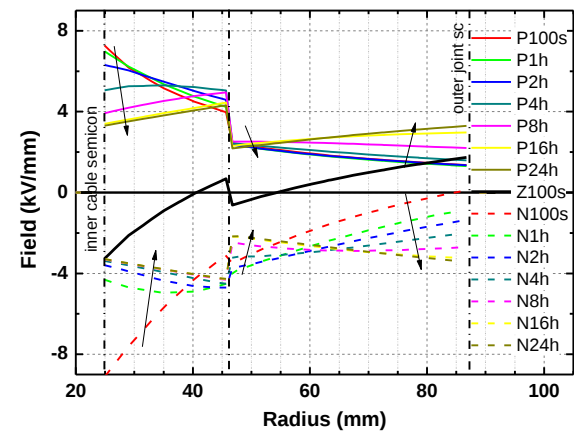
Dans les conditions d'un gradient thermique stationnaire, le champ électrique évolue rapidement vers une situation d'équilibre ; on peut considérer qu'au bout de 8h cet équilibre est atteint, cf. Figure 6b. Ici pour chacun des matériaux le champ tend à augmenter avec le rayon : ceci est dû au fait que le gradient thermique produit un gradient de conductivité dont les effets surpassent la variation du champ due à la géométrie cylindrique. Le champ résiduel, pris 100 s après remise à zéro du potentiel est moins marqué ou en tous cas présente un profil différent de celui du cas isotherme. La valeur plus faible du champ résiduel provient du fait que dans ces conditions thermiques, avec une température à l'interface diélectrique/diélectrique de 45°C, et des champs de l'ordre de 3 kV/mm, les conductivités des deux matériaux sont assez proches. De plus, en comparant le saut de champ sous tension et hors tension, on peut remarquer qu'il a diminué dans les 100 s suivant la remise à zéro du potentiel, en raison de la dissipation partielle de la charge d'interface. A l'inversion de polarité, le champ à l'âme est fortement renforcé.



a) Isotherme 30°C



b) Gradient thermique stationnaire



c) Thermique et électrique instationnaire

Fig. 6. Distribution radiale de champ dans la jonction à différents temps après application de la tension (200 kV suivis d'une inversion) pour différentes conditions thermiques. Distribution prise à $z=800$ mm. Les lignes verticales indiquent les limites des isolants. La courbe en noir correspond à la remise à 0 après 24 h sous +200 kV.

La combinaison de conditions électriques et thermiques instationnaires produit principalement un ralentissement de la mise en équilibre, la température s'établissant progressivement. La distribution de champ au bout de 24 h est identique à celle dans le cas du gradient stabilisé. A fortiori, il en est de même pour les profils ultérieurs.

3.3. Composante tangentielle du champ

La distribution de champ dans la direction radiale de l'isolant est un élément à considérer, que l'on peut relativement bien anticiper moyennant une connaissance du comportement des matériaux. Cependant, une attention particulière doit être

accordée également au champ électrique tangentiel dans l'isolation le long de l'interface entre le corps de la jonction et le câble sous différentes contraintes électriques et thermiques. En effet, la confection du joint est une étape délicate dans laquelle toute imperfection comme un défaut d'adhésion ou la présence de bulle d'air peut être préjudiciable d'autant plus si la contrainte électrique est importante. Il a été reporté que ce champ tangentiel à l'interface des deux isolants est distribué de manière nettement non uniforme, avec une forte accentuation du champ au voisinage du semi-conducteur relié à la référence de potentiel [7], [11], [12], [13]. Pour ces raisons, des solutions avec des matériaux gradateurs de champ (FGM) [14] ayant des propriétés fortement non-linéaires ont été adoptées par certains câbliers [6]. Ce n'est cependant pas la règle, des problèmes de fiabilité s'étant manifesté avec cette technologie.

La Figure 7 représente les profils de champ tangentiel à l'interface entre les deux matériaux d'isolation, fonction du temps sous contrainte, et ce pour les trois conditions thermiques considérées. Les profils représentés ont été simulés dans l'EPDM. En condition isotherme (Figure 7a), il est clair que le champ tangentiel est nettement plus important sur la droite de la figure. Ceci peut s'expliquer par le fait que la géométrie choisie ne comporte pas de cône répartiteur de champ, contrairement au côté référence de potentiel aux extrémités de la jonction. En fait certains designs reprennent un cône déflecteur y compris sur la partie centrale soumise à la haute tension [12]. Le champ axial quasi-constant sur la partie gauche de la figure correspond précisément à la région où le cône produit une composante non radiale au champ. Au cours du temps le champ tangentiel tend à diminuer du côté du cône et à se renforcer de manière significative dans la partie centrale. Ces tendances reflètent le caractère non linéaire de la conductivité ainsi que le gradient de conductivité dû à la présence de deux isolants. Il est difficile à anticiper/expliciter compte tenu de la divergence de la géométrie.

En condition de gradient thermique (Figure 7.b), le champ augmente au cours du temps du côté de la référence de potentiel, au point de tripler. De ce fait dans les premiers instants de l'inversion de polarité le signe du champ ne s'est pas inversé. Côté haute tension, les variations de champ sont plus faibles. On peut noter la présence d'un champ résiduel négatif qui vient s'additionner au champ appliqué après inversion, et donc produit une sur-contrainte. Les observations qui sont faites pour le cas d'une situation de gradient thermique stationnaire sont quasiment les mêmes dans des conditions thermiques instationnaires (Figure 7c). Globalement, les valeurs de champs tangentiels restent plus faibles que dans le cas d'une condition isotherme. Ceci n'est pas nécessairement un effet du gradient thermique mais du fait que, compte tenu des contraintes moyennes appliquées, les valeurs de conductivité des deux isolants se rapprochent en échauffant la jonction : elles sont identiques à 60°C pour un champ de 5kV/mm, alors qu'à 30°C l'équivalence est obtenue sous un champ de 15 kV/mm qui n'est jamais atteint ici. Un étude plus complète avec des isothermes à différentes températures ou la considération de deux matériaux d'isolation identiques pour le joint et le câble permettrait de le vérifier.

Pour obtenir une distribution de champ tangentielle acceptable le long de l'interface, les conductivités des deux isolations devraient être proches. Or, le champ est non homogène dans la jonction de même que la température et nous avons vu dans les mesures que seulement dans des combinaisons (champ-température) particulières des valeurs égales de conductivité sont obtenues. Il est en fait difficile d'avoir des conductivités semblables à partir de matériaux si différents que

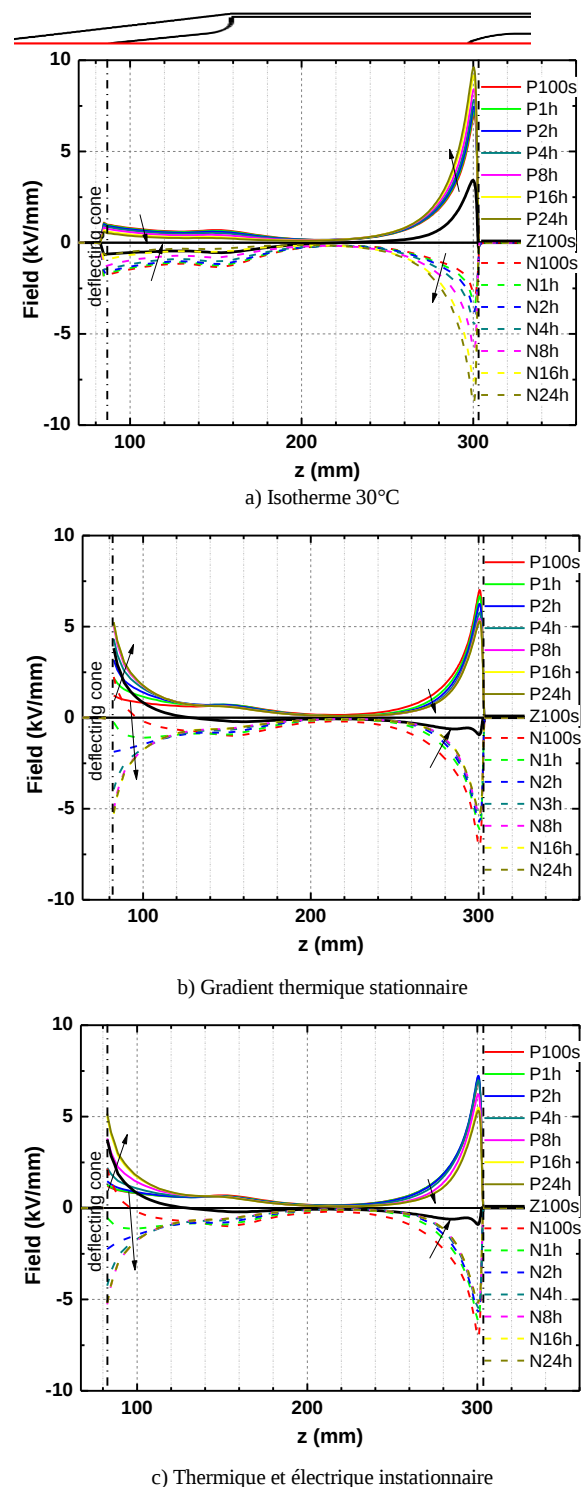


Fig. 7. Distribution de champ axial à l'interface XLPE/EPDM à différents temps après application de la tension (200 kV suivis d'une inversion) pour différentes conditions thermiques. Les lignes verticales indiquent les limites des isolants. La courbe en noir correspond à la remise à 0 après 24 h sous +200 kV. Référence de potentiel à gauche; haute tension à droite. Une partie du schéma de la jonction est représenté sur le haut de la figure pour positionner le profil par rapport à celle-ci.

des silicones ou EPDM et le XLPE. L'utilisation d'élastomère reste indispensable pour appliquer une pression homogène et épouser la forme du câble isolé. On évite ainsi le cheminement de surface, les décharges de surface et les défaillances qui en découlent. Cependant, le passage du polyéthylène réticulé à un élastomère conduit à avoir des comportements diélectriques différents, que ce soit les processus de conduction ou les dépendances en champ et en température qui en découlent. Il est

en outre compliqué de produire des matériaux ayant une conductivité électrique prédéfinie.

Par rapport à d'autres études sur les distributions de champ dans les joints, le travail présenté ici considère les conditions transitoires d'établissement du champ alors que bien souvent seule une résolution directe en stationnaire est proposée. De multiples conditions de contraintes peuvent être testées. Ceci est assez facilement réalisable, mais il est important de souligner que la collection de données expérimentales sur la conductivité, représentatives des matériaux dans leur environnement de fonctionnement, est une étape préalable capitale dans tout ce travail de modélisation et de conception.

4. CONCLUSIONS

Une modélisation spatiotemporelle des distributions de température et de champ dans un modèle de jonction de câble a été réalisée, à partir de données expérimentales sur la conductivité des isolants et en considérant des conditions instationnaires du point de vue électrique et thermique.

Si l'on considère la distribution radiale du champ, le gradient température, et la conduction non linéaire, jouent un rôle de gradateur de champ. Cependant cet effet est annulé lors des inversions de polarité. Les répartitions tangentielles du champ le long de l'interface entre l'isolant du joint et celui du câble ont des comportements temporels et en température qui ne se déduisent pas de manière simple des conditions de contrainte. Le champ près des éléments semi-conducteurs peut être augmenté ou diminué au cours du temps.

5. REMERCIEMENTS

Ce projet bénéficie d'un support CNRS Programme International de Coopération Scientifique N° PICS07965.

6. REFERENCES

- [1] G. Mazzanti, M. Marzotto, *Extruded cables for High-Voltage Direct-Current transmission*, Wiley-IEEE Press, New Jersey, 2013
- [2] D. Fabiani, G.C. Montanari, C. Laurent, G. Teyssedre, P.H.F. Morshuis, R. Bodega, L.A. Dissado, "HVDC cable design and space charge accumulation. Part 3: Effect of temperature gradient," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 24_2, pp. 5-14, 2008
- [3] T.T.N. Vu, G. Teyssedre, B. Vissouvanadin, S. Le Roy, C. Laurent, "Correlating conductivity and space charge measurements in multi-dielectrics under various electrical and thermal stresses," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, pp. 117-127, 2015
- [4] S.J. Frobin, C.F. Niedik, C. Freye, F. Jenau, D. Häring, G. Schröder, "A generic approach for HVDC cable accessories modelling," *Proc. 2018 IEEE Internat. Conference on Dielectrics (ICD)*, Budapest, pp. 1-6, 2018
- [5] M. Saltzer, T. Christen, T. Sörqvist, M.J.P. Jeroense, "Electrothermal simulations of HVDC cable joints," *Proc 2011 VDE-ETG Workshop Feldsteuernde Isoliersysteme, ETG-Fachbericht 131*, pp. 1-6, 2012
- [6] F. Fälth, S. Kumar, H. Ghorbani, "Robustness analysis of classical high voltage joint design under high voltage DC stress", *Proc. 23rd Nordic Insulation Symposium*, pp. 140-145, 2013
- [7] G. Mazzanti et al., "The insulation of HVDC extruded cable system joints. Part 1: Review of materials, design and testing procedures," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 26, pp. 964-972, 2019
- [8] H. Ye, T. Fechner, X. Lei, Y. Luo, M. Zhou, Z. Han, H. Wang, Q. Zhuang, R. Xu, D. Li, "Review on HVDC cable terminations," *IET High Volt.*, vol. 3, pp. 79-89, 2018
- [9] C. Stancu, P.V. Notingham, P. Notingham, M. Lungulescu, "Space charge and electric field in thermally aged multilayer joints model," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 23, pp. 633-644, 2016
- [10] T.T.N. Vu, G. Teyssedre, B. Vissouvanadin, S. Le Roy, C. Laurent, M. Mammeri, I. Denizet, "Field distribution under temperature gradient in polymeric MV-HVDC model cable: simulation and space charge measurements", *Eur J. Electr. Engg.*, vol. 17, pp. 307-325, 2014
- [11] H. Ghorbani, M. Jeroense, C.-O. Olsson, M. Saltzer, "HVDC cable systems—Highlighting extruded technology," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 29, pp. 414–421, 2014
- [12] H. Ye, Z. Han, Y. Luo, Q. Zhuang, T. Fechner, H. Wang, X. Lei, "Design aspects on HVDC cable joints," *Proc. 12th Int. Conf. Prop. Appl. Dielectr. Materials (ICPADM)*, pp. 300–304, 2018
- [13] F. Mauseth, H. Haugdal, "Electric field simulations of high voltage DC extruded cable systems," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 33_4, pp. 16-21, 2017
- [14] L. Donzel, F. Greuter, T. Christen, "Nonlinear resistive electric field grading Part 2: Materials and applications," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 27_2, pp. 18–29, 2011