

Calcul et Mesure de l'Impédance des Réseaux de Terre : Comparaison entre l'Approche Analytique et la Modélisation par Éléments Finis

Philomène CARTON^{1a,2}, Stéphane CLENET², Jean-Pierre DUCREUX^{1b}, Yvonnick LE MENACH², Jérémy NICOLAS-GUIZON^{1a}, François-X ZGAINSKI^{1a}

^{1a} EDF, 134 Chem. De l'Étang, 38 950 St Martin-le-Vinoux

^{1b} EDF R&D, ERMES, 91 120 Palaiseau, France

² Univ. Lille, Arts et Metiers Institute of Technology, Centrale Lille, JUNIA, ULR 2697 - L2EP, F-59000 Lille, France

RESUME – Un réseau de terre fonctionnel est une exigence légale permettant de garantir la sécurité des personnes et des installations. Pour être conforme à la réglementation, les installations de puissance de production hydraulique en France doivent posséder une impédance de terre inférieure à 1 Ω . Cette valeur peut être mesurée sur site par la méthode à chute de potentiel. Dans le cadre des expertises « terrains » menées sur les réseaux de terre des centrales hydroélectriques, la mesure peut s'avérer difficile à mettre en œuvre. Une comparaison avec un modèle analytique, tel que défini dans les textes normatifs, peut alors être utilisée mais reste basé sur des hypothèses fortes. Dans ce travail, nous nous proposons d'évaluer les limites de l'approche analytique en nous appuyant sur un modèle plus fin de l'installation basé sur la méthode des éléments finis.

Mots-clés — Réseau de terre, Réseau d'équipotentialité, Impédance de terre, Elévation de potentiel, Electrode de terre, Éléments finis

1. INTRODUCTION

Un Réseau Général de Terre (RGT) est constitué d'une ou plusieurs électrodes de terre et d'un réseau d'équipotentialité. L'électrode de terre est définie comme un ensemble de conducteurs enterrés, en contact direct avec le sol et reliés électriquement entre eux [1]. Le réseau d'équipotentialité permet de relier les différentes électrodes de terre les unes aux autres.

Un RGT a pour fonction principale de garantir la sécurité des personnes et l'intégrité du matériel en facilitant l'écoulement d'un courant de défaut dans le sol et en limitant l'élévation de gradient de potentiel au sol. Ce courant de défaut peut être de différentes natures : courant à fréquence industrielle, courant de foudre, de manœuvre, etc. Dans cet article on se limite à l'effet des courants de défaut à fréquence industrielle.

La méthode la plus simple et conservatrice pour obtenir l'élévation maximale du potentiel de surface d'un site est de multiplier la valeur du courant de défaut par la valeur de l'impédance du réseau de terre. Cette élévation, notée U_E sur la Fig. 1, dépend principalement de :

- la structure du réseau de terre,
- la valeur du courant de défaut considéré pour l'étude, en l'occurrence le courant de court-circuit monophasé maximal,
- la résistivité du sol.

À la fréquence industrielle, la doctrine d'EDF Hydro, pour ses centrales hydroélectriques, est de maintenir l'élévation de potentiel du site inférieure à 6kV. Le courant de défaut pouvant atteindre plusieurs kiloampères, il est souvent nécessaire d'avoir une impédance de terre inférieure à 1 Ω comme mentionné dans les normes [2], [3].

Cependant, une faible impédance, à elle seule, ne suffit pas à garantir la sécurité des personnes. Pour être fonctionnel, un RGT doit posséder un réseau d'équipotentialité irriguant l'ensemble de l'installation : les prises de terre, les ferrallages des dalles, tous les équipements conducteurs, ... Ce dernier, avec la structure de l'électrode de terre, permet de contrôler les variations de potentiel à l'intérieur et aux abords du site. L'objectif est de maintenir des seuils de tensions de pas et de contact acceptables. Ces tensions sont définies par [1] :

- Tension de pas U_{VS} : la différence de potentiel entre deux points à la surface du sol séparés par une distance de 1m, U_{VS} sur la Fig. 1.
- Tension de contact ou de toucher U_{VT} : la différence de potentiel entre une structure métallique mise à la terre et un point situé à la surface du sol à une distance de 1m, U_{VT} sur la Fig. 1.

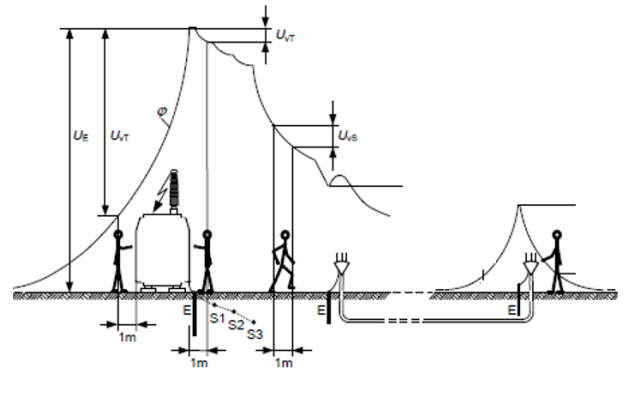


Fig. 1. : Elévation du potentiel de surface lors d'un défaut à la terre [3].

La plupart du temps, dans un aménagement hydroélectrique, la centrale est équipotentielle avec le poste de transformation HT, la conduite forcée et éventuellement les locaux des vannes de tête et des barrages. Les différents réseaux de terre sont donc

connectés. Il est difficile de déterminer la zone d'influence et l'impédance d'un réseau de terre étendu. Pour la calculer, les textes réglementaires proposent des approches analytiques. Ces approches sont basées sur des hypothèses fortes concernant la géométrie de l'installation et dont les limites peuvent être discutées. Dans ce travail, nous nous proposons donc de comparer ces modèles analytiques avec des modèles plus précis basés sur la méthode des éléments finis.

Dans cet article, nous commencerons par définir ce qu'est l'impédance de terre. Ensuite, le calcul de l'impédance d'une prise de terre cylindrique sera effectué par la méthode des éléments finis. Sa géométrie simple facilitera la comparaison des résultats avec les formules analytiques permettant ainsi de valider le choix des hypothèses. Enfin la modélisation d'une électrode de terre maillée sera abordée.

2. CALCUL DE L'IMPÉDANCE DE TERRE : APPROCHE ANALYTIQUE

2.1. Généralités

La valeur de l'impédance d'un réseau de terre est définie comme l'impédance mesurée, à une certaine fréquence, entre un point donné du réseau de terre et la terre de référence [1]. Pour des fréquences faibles, on peut parler de résistance de terre.

La terre de référence, aussi appelée terre distante, est par définition : « une partie de la Terre considérée comme conductrice, dont le potentiel électrique est pris, par convention, égal à zéro, étant hors de la zone d'influence de toute installation de mise à la terre concernée » [3]. Ainsi, peu importe le courant de défaut qui s'y propage ou la tension qui y est appliquée, le potentiel y restera nul [4].

L'impédance d'un réseau de terre dépend donc principalement de la structure du réseau de terre et de la nature du sol. Si pour simplifier les calculs, on considère parfois le sol comme étant homogène, cela est rarement le cas dans la réalité. Des modèles multicouches sont souvent plus précis mais perfectibles. La conductivité du sol évolue avec les variations météorologiques en particulier l'humidité. L'impédance est par exemple plus élevée en été dans des conditions de sécheresse qu'en automne si le sol est gorgé d'eau [5].

Plus l'impédance est basse, plus le courant de défaut s'écoulera facilement dans le sol et l'élévation de potentiel du site sera faible. Il est donc nécessaire de mesurer cette impédance avec précision.

2.2. Méthode de mesure

L'une des méthodes la plus utilisée et employée par les équipes de la DTG (Division Technique Générale) d'EDF Hydro, est la méthode à chute de potentiel, illustrée sur la Fig. 2.

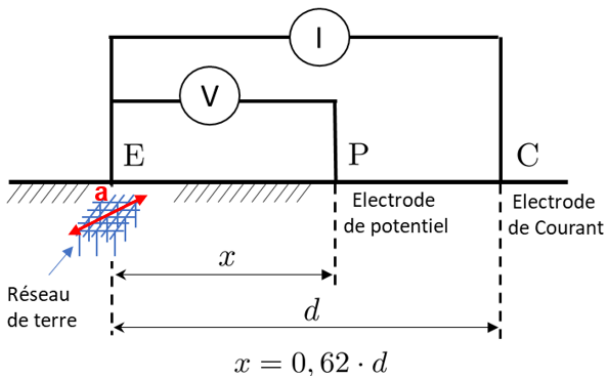


Fig. 2. Schéma de la méthode à chute de potentiel [6].

Le courant est injecté via l'électrode (ou terre lointaine) située en C et la tension est mesurée entre le réseau de terre et l'électrode placée en P sur la Fig. 2. Le courant se referme par le point E. La partie délicate consiste à placer les terres lointaines (points C et P) hors zone d'influence du réseau de terre de l'aménagement hydroélectrique. Le standard IEEE 80 préconise une distance D supérieure ou égale à 5 à 10 fois la plus grande dimension du réseau de terre [6]. Cela est, dans la plupart des cas, difficile à mettre en œuvre car il faudrait la positionner à des distances supérieures à 500 m, pouvant atteindre quelques kilomètres. Dans ce cas, la valeur mesurée peut être plus élevée que la valeur réelle du réseau de terre. Pour positionner l'électrode de potentiel (P), la règle des 62 % est utilisée. Elle a été décrite en premier par Tagg [7] qui considérait les hypothèses suivantes : le sol est homogène, les électrodes sont alignées avec le réseau de terre et les prises de terre sont considérées comme des sources de courant ponctuels dont les équipotentiels sont hémisphériques.

En effet, si on considère une source de courant, I_0 [A], ponctuelle placée à la surface du sol, on constate que le courant s'écoule radialement autour d'elle (Fig. 3) :

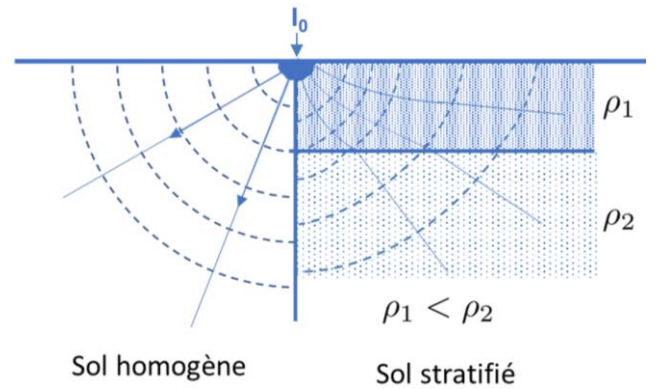


Fig. 3. : Ecoulement du courant par une source ponctuelle [1].

Pour un sol homogène, on peut alors exprimer la densité de courant, J [A/m²], à une distance r [m] de la source de courant, comme suit [8] :

$$J = \frac{I_0}{2\pi r^2} \quad (1)$$

On applique alors la loi d'Ohm :

$$J = \sigma E \rightarrow E = \frac{I_0}{2\pi \sigma r^2} \quad (2)$$

Avec $\sigma = \frac{1}{\rho}$ [S/m] la conductivité électrique du sol qui est donc l'inverse de la résistivité.

Puis comme le champ électrique dérive d'un potentiel et que ce potentiel est considéré nul quand r tend vers une distance infinie (terre de référence), on obtient :

$$V(r) = \int_r^\infty \frac{I_0}{2\pi \sigma r^2} dr = \frac{I_0}{2\pi \sigma r} \quad (3)$$

Dans la méthode à chute de potentiel, on détermine le potentiel au point P, V_P [V], lié au passage du courant entre le réseau de terre et l'électrode C comme [9] :

$$V_P = \frac{I\rho}{2\pi x} - \frac{I\rho}{2\pi(d-x)} \quad (4)$$

Avec x [m] la distance entre le réseau de terre en E et l'électrode de potentiel P et d [m] la distance entre le réseau de terre en E et l'électrode de courant C.

Tandis que le potentiel au point E, V_E [V], est donné par :

$$V_E = \frac{I\rho}{2\pi a} - \frac{I\rho}{2\pi d} \quad (5)$$

Avec a [m], la plus grande dimension du réseau de terre.

Ainsi la tension mesurée, ΔV [V], entre l'électrode P et le point E du réseau de terre est donnée par :

$$\Delta V = V_E - V_P \quad (6)$$

On en déduit que la résistance mesurée vaut :

$$R_m = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{d} - \frac{1}{x} + \frac{1}{d-x} \right) \quad (7)$$

Or ce que l'on cherche est la résistance du réseau de terre, $R_g = \frac{\rho}{2\pi a}$, pour cela il faut que :

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{x} - \frac{1}{d-x} = 0 \quad (8)$$

Ceci est donc valable quand $x = 0,62 * d$ ou $x = 1,62 * d$. Pour des raisons de mise en œuvre de la mesure (injection d'un courant suffisant, diminution de la charge filerie, ...) on choisira la distance la plus faible d'où la règle des 62%.

En pratique, cette configuration de mesure est difficilement respectée comme cela a été mentionné précédemment. Il convient donc de se questionner sur ce qui influence cette mesure et sur son pourcentage d'erreur. C'est pourquoi le recours à des modèles plus précis paraît complémentaire.

2.3. Calculs analytiques

Il existe plusieurs formules analytiques simples pour calculer la résistance d'une prise de terre en fonction de sa géométrie et de la résistivité du sol. Pour une prise de terre cylindrique (piquet de terre, puits de terre, etc.), les trois méthodes de calcul principales sont présentées dans le Tableau 1 :

Tableau 1. Calculs pour la résistance d'une prise de terre cylindrique.

Auteurs	Formules
Rudenberg [10]	$\frac{\rho}{2\pi l} * \ln \left(\frac{4l}{d} \right)$
Dwight-Sunde [11]	$\frac{\rho}{2\pi l} * \left(\ln \left(\frac{8l}{d} \right) - 1 \right)$
Liew-Darveniza [12]	$\frac{\rho}{2\pi l} * \ln \left(\frac{r+l}{r} \right)$

Avec l [m] la longueur de l'électrode de terre, d [m] son diamètre et r [m] son rayon.

Ces modèles découlent de méthodes de calcul différentes. Rudenberg considère que la surface équipotentielle entourant la prise de terre est la somme de l'aire d'un cylindre et d'une demi-sphère [10]. Tandis que Dwight-Sunde se base sur la méthode des images et est souvent citée comme étant l'approche la plus précise et proche de ce que l'on peut obtenir par modélisation [11]. Enfin Liew-Darveniza considère que la prise de terre cylindrique est constituée de n petites sphères empilées, chacune d'elles dissipant dans le sol un courant I/n [12].

Si l'on s'intéresse maintenant à une électrode de terre dont la géométrie ressemble à une grille ou un maillage, par exemple dans les postes hautes tensions, on peut utiliser la formule suivante [6] :

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (9)$$

Avec,

- R_g Impédance de la prise de terre [Ω],
- $\rho = \frac{1}{\sigma}$ Résistivité du sol [$\Omega.m$],
- h Profondeur de l'électrode de terre [m],
- A Aire occupée par la prise de terre [m^2],
- L_T Longueur totale de conducteurs enterrés [m].

Elle a été déterminée par, Sverak, en 1952, qui fut le premier à incorporer la profondeur de la grille dans son calcul (Equation 9). Plus récemment, cette approche a été reprise par V.M.N. Dladla et al [13].

Dans la note H 115 [1], on retrouve une formule simplifiée pour le calcul de la résistance d'une prise de terre maillée dont la profondeur d'enfouissement est faible devant le périmètre de l'électrode :

$$R_g = \frac{2\rho}{P} \quad (10)$$

Avec,

- P Périmètre du maillage [m],
- ρ Résistivité du sol [$\Omega.m$].

Toutes ces équations prennent en compte, la résistivité du sol et la structure du réseau de terre, c'est-à-dire l'aire de la grille de mise à la terre et la longueur totale des conducteurs enterrés.

D'autres proposent de considérer l'influence de l'impédance mutuelle des conducteurs les uns par rapport aux autres. La norme IEEE 80 [6] livre des exemples de calculs d'impédance pour différentes configurations de RGT dans des sols de différentes natures.

Encore une fois, les hypothèses employées dans ces approches analytiques sont souvent simplificatrices (sol homogène, réseau de terre hémisphérique, ...). Pour aller plus loin, il est nécessaire d'utiliser des modèles numériques qui permettent une représentation plus réaliste des phénomènes.

3. MODÉLISATION PAR ÉLÉMENTS FINIS

3.1. Principes généraux

Dans la littérature, on retrouve des études récentes portant sur le calcul d'impédance de prise de terre par la méthode des éléments finis. Cette méthode livre des résultats plus précis [14] car elle permet d'inclure des environnements à frontières ouvertes tel que le sol ou l'air, d'intégrer des électrodes de terre à géométrie complexe et de faire varier la conductivité du sol [15]. À fréquence industrielle, 50 Hz, on peut s'affranchir de la perméabilité et permittivité du sol pour ne considérer que la conductivité. Le calcul d'impédance est un problème résolu dans le cadre des hypothèses de l'électrocinétique dans le cas d'un régime stationnaire ou de l'électro quasi-statique si l'on souhaite prendre en compte un transitoire de courant ou de tension [16].

Dans le cas d'un problème électrocinétique, on cherche à déterminer la densité de courant et la distribution d'un champ électrique dans un conducteur sur lequel on applique une différence de potentiel. Les équations de Maxwell nous intéressent sont donc :

$$\text{rot}(E) = 0 \quad (11)$$

$$\text{div}(J) = 0 \quad (12)$$

Avec, J [A/m²] la densité de courant et E [V/m] le champ électrique.

À ces deux équations, on pourra ajouter la loi d'Ohm (2), définie dans la partie 2.1, et dont la conductivité peut être non constante.

Le domaine peut donc être constitué de plusieurs milieux de conductivités différentes. Dans notre cas on pourra distinguer la conductivité du sol de celle de la prise de terre. Cette première peut varier de 10⁻¹ S/m, par exemple du humus, à 10⁻⁵ S/m, par exemple du granit [3]. Tandis que la conductivité d'une prise de terre en cuivre est de l'ordre de 10⁷ S/m. Cette différence importante dans les ordres de grandeur peut entraîner des instabilités numériques lors de la résolution du problème.

La résolution se fait à l'aide du code Carmel qui est développé par le Lamel, un laboratoire commun entre le L2EP de l'université de Lille et la R&D d'EDF [17]. Dans ce code, on choisit de résoudre le problème en utilisant la formulation en potentiel scalaire électrique φ tel que :

$$E = -grad(\varphi) \quad (13)$$

Cette formulation permet de calculer la distribution de l'élevation de potentiel de surface. Nous pourrions ainsi déterminer l'impédance du réseau de terre.

Le problème à résoudre s'écrit alors sous la forme :

$$div(\sigma grad(\varphi)) = -div(\sigma grad(\varphi_s)) \quad (134)$$

Avec φ_s le potentiel scalaire source [18].

3.2. Choix des hypothèses

Dans un premier temps, le choix des hypothèses est validé en modélisant une prise de terre cylindrique. En effet, sa géométrie simple la rend facile à modéliser et il existe plusieurs formules analytiques pour le calcul de son impédance. Nous pourrions donc comparer les résultats obtenus par la méthode des éléments finis avec ceux déterminés à partir des formules présentées dans le Tableau 1.

Le sol est modélisé par une demi-sphère de rayon X (cf. Fig. 4) et la prise de terre est placée au centre de ce domaine. Tout d'abord, on s'intéresse à la taille du domaine à considérer pour l'étude. On fait donc varier X sur la Fig. 4.

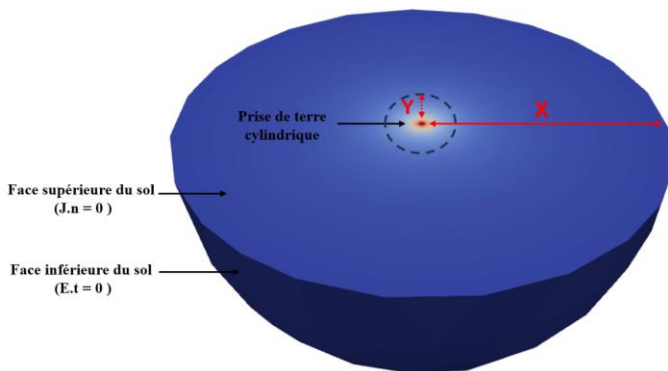


Fig. 4. : Impédance d'une prise de terre cylindrique.

Le courant est imposé sur la face supérieure de l'électrode de terre. Cette dernière, de forme cylindrique, a une hauteur de 1 m et un rayon de 0,004886 m. Au niveau de l'interface air/sol, on considère que la composante normale du courant est nulle tandis qu'au niveau de la face inférieure du sol, c'est la composante tangentielle du champ qui est nulle. La tension est donc mesurée entre l'électrode de terre et le rayon, X , de la demi-sphère.

Plus X est grand, plus on sort de la zone d'influence de l'électrode pour se rapprocher de la notion de terre de référence. Finalement, le rapport entre la tension et le courant nous donne l'impédance de l'électrode [19].

Sur la Fig. 5, on peut observer que l'impédance tend vers une asymptote horizontale lorsque le domaine est dix fois plus grand que la profondeur de la prise de terre. Choisir un domaine dont le rayon est égal à dix fois la plus grande dimension de la prise de terre paraît donc être un bon compromis entre précision et temps de calcul.

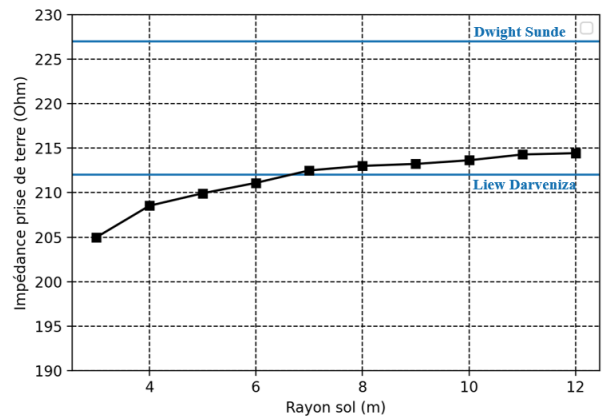


Fig. 5. : Variation de l'impédance en fonction de R

On peut maintenant se questionner sur l'influence du maillage au plus proche de la prise de terre. Effectivement, c'est la distribution de courant dans la proximité immédiate de l'électrode de terre qui influe le plus sur la valeur de l'impédance. En choisissant un maillage modéré (99 730 éléments), nous trouvons une valeur d'impédance de 205,38 Ω tandis qu'avec un maillage plus fin (538 692 éléments), elle est de 217,19 Ω . Cette deuxième valeur étant plus proche des résultats analytiques, on en déduit qu'il est important d'avoir un maillage assez fin autour de la prise de terre. Il s'agit alors de trouver le bon compromis entre temps de calcul et précision.

Il paraît donc naturel de s'interroger sur la taille du domaine dans lequel il faut appliquer une hypothèse de maillage forte. Pour cela on définit donc une nouvelle demi-sphère en pointillée sur la Fig. 4 de rayon Y , compris entre 1,5 m et 2 m autour de la prise de terre et dans laquelle le maillage est affiné. Dans le Tableau 2, on peut constater que les variations de la valeur d'impédance représentent moins de 0,5% de la valeur maximale de l'impédance de la prise de terre et peuvent donc être négligées.

Tableau 2 : Impédance en fonction du maillage.

Demi-sphère de maillage plus fin (Y)	Impédance
1,5 m	213,4 Ω
1,7 m	214,17 Ω
1,9 m	214,22 Ω
2 m	213,91 Ω

On en conclut qu'un maillage suffisamment fin autour de l'électrode de terre est important mais qu'il n'est pas nécessaire qu'il le soit sur l'ensemble du domaine. Pour calculer l'impédance de prise de terre plus complexe, on choisira donc de réaliser un sous-maillage plus fin au niveau de l'électrode de terre.

Enfin on constate en faisant varier la longueur de la prise de terre pour un rayon constant de 2,5 cm que les solutions livrées par la modélisation sont situées entre les calculs de Dwight-Sunde et Liew-Darveniza (Fig. 6) dépendamment des dimensions de la prise de terre. Ces deux méthodes sont réputées être les plus précises. On peut donc valider ces résultats ainsi que le choix de nos hypothèses et de la formulation.

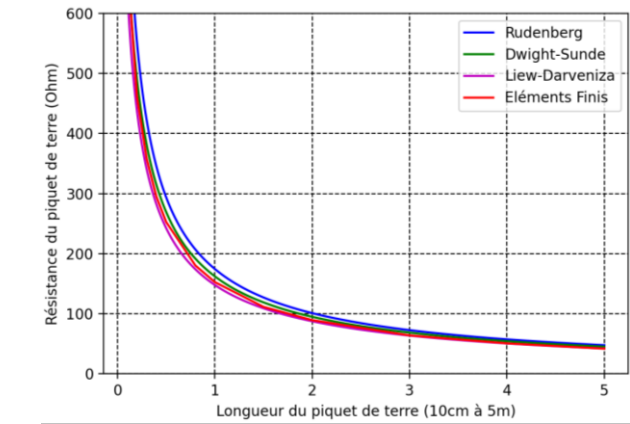


Fig. 6. : Modèle Analytiques vs Modèle Numérique

3.3. Modélisation d’une grille de mise à la terre

On s’intéresse maintenant à la modélisation d’une électrode de terre en forme de maillage. Les difficultés rencontrées sont liées à la géométrie de la structure : conducteur de section grandement inférieure à l’étendu du réseau de terre. À cela s’ajoute la différence d’ordre de grandeur entre la conductivité de la prise de terre et celle du sol. Le choix de la finesse du maillage a donc son importance.

Deux modèles de grille de géométrie relativement simple sont réalisés. La première est de dimension 4m x 4m, la seconde de 12m x 12m (cf. Fig. 7). Ces électrodes sont enterrées dans un sol de résistivité de 250 Ω.m et à une profondeur de 0,8m. L’impédance de chacune d’elles est calculée ainsi que la distribution du potentiel de surface.

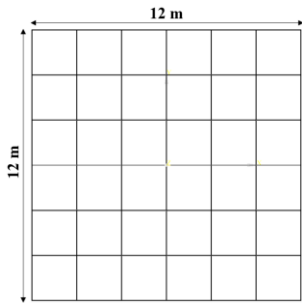


Fig. 7. : Electrode de terre maillée

Pour aider au maillage, deux sous-maillages sont réalisés. Le premier au niveau de la grille et le second autour de la grille avec des hypothèses plus fines que celles appliquées sur le reste du domaine du sol (Fig. 8).

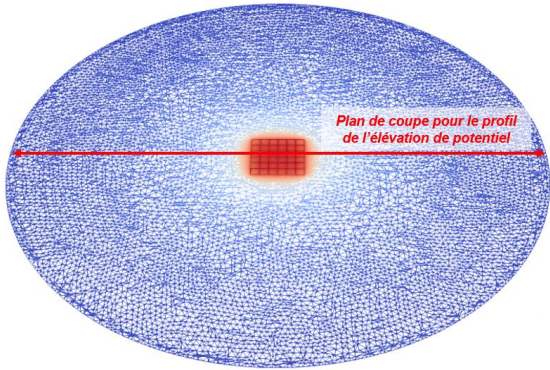


Fig. 8. : Potentiel et maillage de la grille de terre 12mx12m

L’impédance de l’électrode de terre peut alors être calculée. Dans le Tableau 3, on remarque que plus l’électrode en forme de maillage est étendue plus les formules analytiques s’approchent du résultat obtenu par la méthode des éléments finis et sont donc significatives. Comme attendu, elles sont plus précises sur l’électrode d’une superficie de 144m² que lorsqu’elles sont appliquées pour le calcul d’une électrode de 16 m². L’erreur par rapport aux résultats obtenus par la méthode des éléments finis reste toutefois conséquente, il faudrait modéliser des électrodes de plus en plus grandes afin de vérifier la convergence des formules.

Tableau 3 : Impédance d'une électrode de terre maillée.

Grilles	IEEE 80 Équation (9)	H 115 Équation (10)	Modélisation
4m x 4m	31,43 Ω	31,25 Ω	21,59 Ω
12 m x 12m	9,73 Ω	10,42 Ω	7,56 Ω

Les figures ci-dessous (Fig. 9) représentent l’élévation de potentiel au niveau de la surface du sol (gauche) et au niveau de l’électrode de terre à une profondeur de 0,8 m (droite). L’élévation de potentiel est calculée selon un axe transversal, ligne rouge sur la Fig. 8. On remarque que la grille est bien équipotentielle. Au niveau de la surface du sol, on peut observer la décroissance de potentiel autour de la grille qui peut aboutir, dans le cas d’un courant de défaut de plusieurs kiloampères à l’apparition de tensions de pas dangereuses si la conception de l’électrode de terre n’est pas optimale.

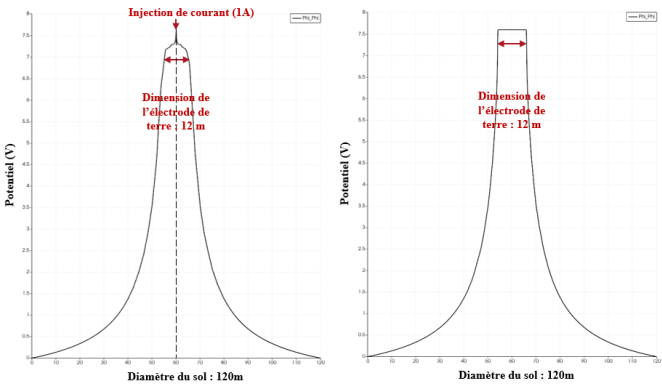


Fig. 9. : Elévation de potentiel à la surface du sol (gauche) et au niveau de l’électrode de terre (droite)

Le développement de ce modèle permettra d’étudier différentes configurations de prise de terre en fonction du type de sol et de choisir la meilleure structure pour garantir la sécurité des personnes et la protection du matériel. Pour cela il sera nécessaire d’intégrer des électrodes de terre de plus en plus

complexes et de plus grande dimension. En effet, la méthode des éléments finis permet d'effectuer des calculs plus réalistes que ne le permettent les méthodes analytiques : géométrie plus réaliste de l'électrode de terre et sol hétérogène.

4. CONCLUSIONS

Ce travail vise à comparer les résultats issus d'approches analytiques provenant des normes en vigueur, avec ceux obtenus par la méthode des éléments finis pour la modélisation des réseaux de terre.

Dans un premier temps le rappel de l'intérêt et des fonctions d'un réseau de terre a permis de poser les fondements théoriques du problème. Bien que la mesure d'impédance par la méthode à chute de potentiel soit techniquement difficile à mettre en œuvre, elle demeure une exigence légale. La modélisation pourrait donc permettre d'évaluer les incertitudes pesant sur cette mesure et de déterminer les seuils admissibles de tension de pas et de contact.

Puis la modélisation d'une prise de terre simple, de forme cylindrique, a servi à valider les hypothèses de départ en confrontant les résultats numériques aux calculs analytiques. Cette étape a permis de s'assurer de la pertinence de l'approche par éléments finis pour des cas simples.

Par la suite, une électrode de terre maillée, plus complexe, a été étudiée. Elle constitue une base de développement pour, à l'avenir, élaborer des modèles plus réalistes. Il conviendra néanmoins de porter une attention particulière à la conception de la géométrie et du maillage afin de garantir la convergence du solveur et la pertinence des résultats.

L'objectif de cette comparaison avec les modèles analytiques est de mieux connaître les limites des méthodes et de tester différentes configurations de grille de mise à la terre de la plus simple à la plus complexe et dans différents types de sol. L'intégration progressive de modèles de sol plus réalistes, incluant l'hétérogénéité de la résistivité du terrain permettra de se rapprocher davantage des conditions réelles.

Les résultats obtenus pourront par la suite être comparés aux mesures d'impédance effectuées par la Direction Technique Générale d'EDF Hydro. Les modèles développés permettront d'optimiser la structure du réseau de terre pour garantir une sécurité maximale.

5. REFERENCES

- [1] Note EDF, Spécification d'entreprise H115 "Principes de conception et de réalisation des mises à la terre", 1984.
- [2] NF C13-200, "Installations électriques à haute tension – Règles complémentaires pour les sites de production et les installations industrielles, tertiaires et agricoles", 2009.
- [3] NF C13-000-2, NF EN 50522, "Prises de terre des installations électriques en courant alternatif de puissance supérieure à 1kV", 2012.
- [4] J.R. Dunki-Jacobs, Conrad St. Pierre, "The function and composition of the global industrial grounding system", IEEE transactions on industry applications, Vol.42, NO. 1, Janvier/Février 2006.
- [5] M.G. Unde, B.E. Kushare, "Impact of seasonal variation of soil resistivity on safety of substation grounding system", Fifth International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing, 2013.
- [6] IEEE Std 80-2000, "IEEE guide for safety in AC substation grounding", janvier 2000.
- [7] G.F. Tagg, "Earth resistance", George Newnes Ltd, England, 1964.
- [8] J. Roudet, E. Clavel, J.M. Guichon et P. Joyeux, "Modélisation par circuits électriques équivalents des réseaux de terre – Théorie." [D 3 073] Réseaux électriques et applications, 2018.

- [9] J. Ma et F. P. Dawalibi, "Extended analysis of ground impedance measurement using the fall-of-potential method", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, n° 4, p. 881-885, oct. 2002.
- [10] R. Rüdenberg, "Grounding principles and practice I — Fundamental considerations on ground currents", *Electrical Engineering*, vol. 64, n° 1, p. 1-13, janv. 1945.
- [11] Erling D. Sunde "Earth conduction effects in transmission systems." New York: D. Van Nostrand Company, Inc., 373, 1949.
- [12] A. C. Liew, M. Darveniza "Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths", *Proc.IEE*, Vol.121, No.2, February 1973.
- [13] V.M.N. Dladla, A.F. Nnachi, R.P. Tshubwana, "Analysis of varying soil resistivity on substation earthing design and performance using ETAP", 2022 30th Southern African Universities Power Engineering Conference (SAUPEC), 2022, p p. 1-6.
- [14] Nenad N. Cvetković, Dejan B. Jovanović, Aleksa T. Ristić, Miodrag S. Stojanović, Dejan D. Krstić, "Comparison of different models for determining the grounding rod resistance", *ELECTROTECHNICA & ELECTRONICA, (E+E)*, Volume 50, Issue 9-10, 2015, p.35-39.2015.
- [15] B. Nekhoul, C. Guerin, P. Labie, G. Meunier and R. Feuillet, "Finite Element Method for calculating the electromagnetic fields generated by substation grounding systems", *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*. VOL 31. NO 3. MAY 1995.
- [16] A. Raizer *et al.*, « A comparative analysis of grounding in different structures: Operational vs. finite element method models », *Electric Power Systems Research*, vol. 230, p. 110243, mai 2024.
- [17] LE MENACH, Y., & KORECKI, J. (Éds.). (2006). *code_Carmel : Code Avancé de Recherche en Modélisation Electromagnétique – Note de principe*. Université de Lille.
- [18] Piriou, F., & Clénet, S. (2023). *Modélisation numérique en électromagnétisme basse fréquence par la méthode des éléments finis*. ISTE Editions.
- [19] Bouderbala Abdelkader, Boubakeur Zegnini, Seghier Tahar, "Determination of the resistance of a grounding system with application of finite element method", *PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY*, mai 2021.