

Maîtrise de la sécurité électrique dans les grandes installations: optimisation de la conception, du dimensionnement et du coût des circuits de terre

Lambert PIERRAT^{1,2}

¹LJK-STAT-M3S (UMR CNRS 5224), BSHM, 1251 Avenue Centrale, BP 47, 38040 Grenoble Cedex 9, France

²LJ-CONSULTING, 21 Allée Jean Wiener, 38400 Saint Martin d'Hères Cedex, France

e_zainescu@yahoo.com

Maîtrise de la sécurité électrique dans les grandes installations optimisation de la conception, du dimensionnement et du coût des circuits de terre

Résumé: Afin de réduire les risques d'électrocution et d'avaries, les installations électriques de grande puissance sont équipées d'un circuit de terre. Il a pour but d'écouler les courants de défaut dans le sol, sa résistance doit être aussi faible que possible. Compte tenu de la diversité des phénomènes mis en jeu, des paramètres correspondants et de la variabilité des caractéristiques du sous-sol, le processus de conception, dimensionnement et optimisation d'un tel circuit est assez complexe. C'est pourquoi on utilise une démarche heuristique basée sur une approche analytique. Ceci permet d'assurer la maîtrise des paramètres d'influence, en particulier la variabilité affectant la conductivité du sous-sol. L'incertitude correspondante amène à caractériser le risque par une probabilité de dépassement des seuils réglementaires. La méthodologie proposée est illustrée par l'étude du circuit de terre relatif à une sous-station alimentant un grand complexe industriel.

Mots-clé: *installation électrique, circuit de terre, sécurité électrique, variabilité du sol, analyse de risque.*

Mastering the safety inside the electrical power substations design, sizing and cost optimization of their grounding circuits

Abstract: In view to reduce the risk of electrocution and damage, the electrical power substations are equipped with an grounding circuit. Because its aim is to disperse the fault currents through the soil, its resistance must be as low as possible. Taking into account the diversity of the concerned phenomena, their corresponding parameters and the sub-soil characteristics variability, the design, sizing and optimising process of such a grounding circuit is rather complex. That is why we use an heuristic process based on an analytical approach. This one permits to master the influencing parameters, especially the variability of the sub-soil conductivity. The corresponding uncertainty leads to characterise the risk through a probability of exceeding the thresholds according to the regulations. The proposed methodology is illustrated by a case study relative to a power sub-station supplying a large industrial complex.

Key-words: *electrical sub-station, grounding circuit, electrical safety, soil variability, risk analysis.*

1. Introduction & Objectifs

Dans divers secteurs (énergies [1,2], industrie [3], transports [4],...) on doit concevoir les installations électriques en vue de limiter les risques liés à leur exploitation: électrocution des personnes et des animaux, avaries matérielles, dégradation de l'environnement. Dans les sous-stations électriques de grande puissance, les surtensions engendrées par des défauts aléatoires tels que les court-circuit ou les coups de foudre, pourraient atteindre, en l'absence de circuit de terre, des valeurs rédhibitoires. La fonction essentielle d'un circuit de terre consiste donc à limiter l'élévation du potentiel du sol à des valeurs réputées admissibles [5].

Les performances générales d'un circuit de terre résultent d'un processus dans lequel interagissent différentes phases: conception, dimensionnement et optimisation technico-économique. L'existence de nombreuses variabilités, fonctionnelles (intensité et fréquence des défauts), structurelles (hétérogénéité et non-invariance du sous-sol) et conjoncturelles (coûts des matériaux et des travaux), introduit un degré de complexité supplémentaire. La diversité des phénomènes physiques concernés (électromagnétiques, géologiques, biologiques), le nombre très élevé des paramètres et leurs dispersions, conduisent à des approches heuristiques. On doit y associer une définition probabiliste des performances, en vue d'une limitation des risques d'avarie, d'accident ou de mort létale.

Nous présentons ci-après une approche méthodologique originale, basée sur deux étapes analytiques successives permettant d'aboutir à une solution compatible avec la nature et la sévérité des contraintes imposées. La démarche est illustrée par l'étude d'une application concrète, relative à la sous-station électrique d'alimentation d'un grand complexe industriel.

2. Caractéristiques générales

2.1 Fonctions d'un circuit de terre

Un circuit de terre est constitué d'un ensemble de conducteurs enterrés dans le sol et reliés entre eux électriquement en vue d'obtenir un plan horizontal qui serait idéalement équipotentiel. En cas de court-circuit de forte intensité ou de coup de foudre, il a pour but de faciliter l'écoulement et la diffusion, au sein du sous-sol, des courants de défaut correspondants et de limiter les différences de potentiel transitoires entre certains points à des valeurs acceptables. Dans ces conditions, un circuit de terre doit assurer essentiellement [1,6,7]:

- la sécurité des êtres vivants (personnes et animaux),
- la protection des équipements électriques,
- la protection des équipements électroniques sensibles,
- le maintien d'un potentiel de référence;

Cette dernière fonction est reliée à la notion importante de maintien d'un plan équipotentiel: il s'agit d'un critère de qualité important qui conditionne le respect des exigences de sécurité .

2.2 Structure d'un circuit de terre

En général, une sous-station électrique s'appuie sur une dalle en béton de forme géométrique rectangulaire, d'épaisseur comprise entre 10 et 30 cm. Le circuit de terre correspondant est constitué d'une grille horizontale conductrice, enterrée sous la dalle à une profondeur comprise entre 0.5 m et 1.0 m et comportant des mailles identiques, carrées ou rectangulaires. Des piquets verticaux sont répartis sur le pourtour de cette grille et raccordés aux nœuds des mailles. Les enveloppes métalliques de protection de tous les équipements supportés par la dalle (transformateurs, armoires de protection, etc...) sont raccordées à la grille par des liaisons conductrices de forte section, capables de véhiculer des courants de défaut suffisamment élevés.

Globalement, le circuit de terre est composé d'électrodes horizontales (cf. les mailles de la grille) et d'électrodes conductrices verticales (cf. les piquets). L'ensemble est immergé dans le sol, la résistivité électrique de ce dernier étant beaucoup plus importante que celle des électrodes réalisées en métal conducteur (cuivre). L'écoulement vers le sol d'un courant de défaut important se traduit par une élévation du potentiel moyen de la grille, égal au produit de l'intensité par la résistance du circuit de terre.

La problématique de conception et de dimensionnement du circuit se résume, d'abord à la détermination de cette résistance et, si nécessaire à sa réduction, si les valeurs des tensions admissibles sont dépassées. A titre indicatif, les normes internationales [1,6] fixent comme objectif initial une valeur maximale de l'ordre de 1 Ohm. Toutefois, dans le cas de sous-stations implantées sur des sols de forte résistivité et soumises à de sévères contraintes dimensionnelles (surface) et fonctionnelles (courants de défaut), une telle valeur est souvent difficile à atteindre.

2.3 Tensions de sécurité

Les tensions admissibles sont définies par la sensibilité du corps humain aux courants électriques, en particulier les seuils relatifs à la fibrillation cardiaque ventriculaire [8,9,10,11]. Le risque de mort létale est conditionné par diverses variables aléatoires, telles que l'amplitude et la durée des courants de terre, la résistance d'isolement des chaussures par rapport au sol, le degré d'humidité relative des mains, le poids de la personne, etc. L'évaluation du risque se résume à la prise en compte de deux catégories de tensions [1,12]:

- la tension de "pas": correspondant à la différence de potentiel, dans le sens du gradient maximal, entre deux points du sol, distants horizontalement de 1 m (entre les deux pieds),
- la tension de "contact" : correspondant à la différence de potentiel entre une structure métallique mise à la terre et un point de la surface du sol, situé à une distance horizontale maxi maximale (soit 1 m, entre un bras tendu et les pieds posés sur le sol).

Les valeurs admissibles correspondent à une faible probabilité de fibrillation ventriculaire (< 0.5 %). Elles sont définies par la relation suivante, pour une personne standardisée de 70 kg:

$$E_j^a = (10^{-3}) \cdot (50\pi / \sqrt{t_f}) \cdot [1 + (F_j \cdot C_s \cdot \rho_s / 1000)] \quad (1)$$

Nota: voir la liste des symboles et notations en annexe.

Chaque tension est inversement proportionnelle à la racine carrée de la durée du défaut et proportionnelle à la résistivité superficielle du sol [12].

Comme on a: $F_{j=s} = 6 > F_{j=t} = 3/2$, la tension de "pas" sera toujours supérieure à la tension de "contact" et c'est cette dernière qui imposera généralement les contraintes de sécurité.

3. Dimensionnement préliminaire

On suppose préalablement que le sol est un milieu semi-infini, homogène et de résistivité constante [1,6]. Cette résistivité doit être estimée en interprétant les valeurs mesurées sur quelques sondages géologiques plus ou moins proches à l'aide des informations disponibles quant à la nature et aux caractéristiques du sous-sol.

Cette situation est souvent imposée par la logique de déroulement des grands projets, laquelle implique une planification très serrée, associant étroitement différentes séquences d'étude et de réalisation. L'hypothèse de résistivité constante permet d'obtenir des résultats analytiques relativement simples, ce qui présente plusieurs avantages: d'une part éviter le recours à des programmes de calcul, d'autre part estimer et hiérarchiser l'influence des nombreux paramètres.

Ces programmes de résolution numérique, basés sur la méthode des images ou les éléments finis, fournissent certes des résultats intrinsèquement plus précis sur le plan électromagnétique, mais cette précision est illusoire au stade d'un avant-projet, dès lors que l'hypothèse de résistivité constante sera ultérieurement mise en défaut.

La résistance équivalente du circuit de terre peut être déterminée en considérant celles des différentes électrodes et leurs éventuelles interactions. Toutes les résistances élémentaires étant proportionnelles à une même résistivité, on peut se ramener à une configuration électrostatique définie uniquement par sa géométrie.

3.1 Résistance de la grille

La grille peut être décomposée en deux éléments: une boucle, définie par son périmètre, et l'ensemble du quadrillage interne. La résistance est une forme additive, définie pour une géométrie carrée idéale. Elle peut être corrigée pour tenir compte de sa forme géométrique réelle, généralement différente.

3.1.1 Résistance du maillage

Le maillage de la grille est une électrode assimilable à un conducteur rectiligne horizontal.

Sa longueur équivalente est égale à la longueur cumulée de tous les conducteurs de la grille (périmètre et quadrillage interne):

$$(R_g / \bar{\rho}) = (1/L_c) \quad (2)$$

La résistance de la grille est inversement proportionnelle à cette longueur cumulée et elle ne dépend pas de la profondeur d'enfouissement.

3.1.2 Résistance de la boucle

Le périmètre de la grille délimite la surface d'une boucle horizontale fermée enfouie dans le sol. Sa résistance équivalente dépend principalement de l'inverse de la racine carrée de sa surface (assimilable à une longueur caractéristique de la géométrie considérée):

$$(R_l / \bar{\rho}) = (1/\sqrt{A}) \cdot [1 + C(h/\sqrt{A})] \quad (3)$$

Un terme correctif intervient, pour tenir compte du rapport entre la profondeur d'enfouissement et la longueur caractéristique.

3.1.3 Résistance de la grille

La somme des deux composantes précédentes doit être corrigée par un facteur géométrique:

$$R_{gl} = (R_g + R_l) \cdot C(\sqrt{A}/L_p) \quad (4)$$

Celui-ci fait intervenir la surface de la boucle et la longueur de son périmètre, comme mesure d'écart par rapport à la géométrie carrée.

3.2 Résistance du réseau de piquets

Elle dépend à la fois de la résistance élémentaire d'un piquet vertical considéré isolément, du nombre de piquets localisés sur le périmètre de la grille et d'un effet d'interactions mutuelles.

3.2.1 Résistance élémentaire d'un piquet

Il s'agit d'une électrode verticale implantée dans le sol. Sa résistance dépend principalement de sa longueur:

$$(R_{r1} / \bar{\rho}) \approx (1/2\pi \cdot l_r) \cdot Ln(3 \cdot l_r / d_r) \quad (5)$$

Son diamètre intervient marginalement, dès lors que son rapport à la longueur est suffisamment faible.

Le terme correctif intervenant dans l'expression (3) étant voisin de l'unité, on constate qu'à longueur égale, la résistance équivalente d'une électrode horizontale est approximativement le double de celle d'une électrode verticale.

Ceci nous conduira, préalablement à équiper la grille de piquets et, ultérieurement, à optimiser le nombre et la longueur de ces piquets.

L'objectif consistera à réduire la valeur de la résistance équivalente de terre ainsi que le coût des matières actives et des travaux de réalisation, compte tenu d'une meilleure connaissance de la résistivité du sous-sol.

3.2.2 Résistance du réseau de piquets

La résistance équivalente du réseau n'est pas définie par la simple mise en parallèle des résistances élémentaires. Un effet de proximité défavorable intervient, d'autant plus prononcé que leur nombre, ainsi que le rapport entre leurs intervalles successifs et leur longueur, sont élevés:

$$(R_r/R_{r1}) = (1/N_r) \cdot [1 + F(l_r/D_r, l_r/d_r) \cdot F(N_r)] \quad (6)$$

Cette contrainte tend à limiter l'efficacité intrinsèque des piquets verticaux, puisque les dimensions de la grille sont conditionnées par celles de la dalle [13].

3.3 Résistance du circuit de terre

De même que pour le réseau de piquets, une interaction mutuelle intervient entre les électrodes horizontales (cf. la grille) et les électrodes verticales (cf. le réseau de piquets). Cette interaction étant géométriquement plus complexe que la précédente, il est nécessaire de faire apparaître une résistance mutuelle qui dépend du rapport entre la longueur cumulée des piquets et la longueur du maillage de la grille:

$$(R_m/\bar{\rho}) = (1/\pi \cdot N_r \cdot l_r) \cdot F(L_c/l_r) \quad (7)$$

Finalement, la résistance équivalente du circuit de terre s'écrit:

$$(1/R_e) \approx (1/R_{gl}) + (1/(R_r + R_m)) \quad (8)$$

Elle correspond à la mise en parallèle des résistances de grille et du réseau de piquets, cette dernière étant majorée de la résistance d'interaction mutuelle.

4. Dimensionnement final

4.1 Résistivité du sous-sol

Si l'on peut avoir une meilleure connaissance du sous-sol, suite à des mesures de résistivité plus précises ou à des sondages plus proches et plus profonds, il est possible de corriger les résultats obtenus lors de la phase de dimensionnement préliminaire.

Parmi les méthodes de mesure de la résistivité, celle de Wenner [14, 15] est la plus courante. Cependant, elle ne permet pas d'accéder valablement à la résistivité locale correspondant à une profondeur supérieure à la moitié de la distance entre les quatre électrodes auxiliaires de mesure. Cette limitation intervient souvent lors de la phase préliminaire d'exploration du site, lorsque le relief ou l'encombrement terrain ne s'y prêtent pas. La méthode de Wenner permet de déterminer une résistivité locale (à une

profondeur déterminée) par le biais d'un traitement non-linéaire des valeurs mesurées en fonction de la distance horizontale entre les électrodes auxiliaires de mesure:

$$2\rho(z=x) \equiv \rho(z=2x) + \rho_{av}(x) \quad (9)$$

On peut alors substituer, à la valeur initialement supposée constante de la résistivité, une valeur moyenne correspondant à une électrode hémisphérique fictive de rayon égal à la profondeur considérée:

$$\bar{\rho}(z) = (1/z) \cdot \int_0^z \rho(z) \cdot dz \quad (10)$$

On notera que, si la valeur de la résistivité locale diminue de façon monotone en fonction de la profondeur (ce qui est fréquemment le cas), la valeur moyenne correspondante est toujours plus élevée.

4.2 Résistance du circuit de terre

A chacune des composantes de la résistance équivalente du circuit de terre, on associe une résistivité spécifique de sa géométrie, donc d'une profondeur caractéristique définie comme suit:

- résistance du maillage: profondeur de la grille,
- résistance de boucle: demi - axe de l'ellipsoïde,
- résistance d'un piquet: profondeur de la pointe,
- résistance mutuelle: profondeur de la grille;

Connaissant le courant de défaut maximal, on peut estimer l'élévation du potentiel moyen du circuit de terre:

$$GPR = R_c \cdot I_g \quad (11)$$

Ce potentiel donne une idée de la sévérité des contraintes relatives à l'installation considérée et il peut servir de base à une définition, en valeur relative, des tensions de sécurité.

4.3 Tensions de sécurité

Les deux types de tensions, de "pas" et de "contact", s'expriment de manière analogue: elles sont toutes deux proportionnelles au courant de défaut et à la résistivité du sous-sol, et inversement proportionnelles à une longueur caractéristique qui dépend d'une pondération entre les longueurs cumulées des électrodes verticales et horizontales:

$$E_j = (K_j \cdot K_i) \cdot (\bar{\rho}_j/L_j) \cdot (I_g) \quad (12)$$

Dans les coefficients sans dimension n'interviennent que les caractéristiques géométriques du circuit de terre[12].

Dans le cas d'une grille régulièrement maillée, la tension de "contact" maximale apparaît au sein des mailles proches des sommets.

En matière de respect des règles de sécurité, ces tensions effectives devront être inférieures aux tensions admissibles définies par l'expression (1).

5. Etude d'un cas d'application

5.1 Caractéristiques générales

Il s'agit d'un complexe industriel de très grande étendue spatiale, comportant de multiples plates-formes électriques, parmi lesquelles la plus contrainte est la sous-station d'alimentation principale du site[16]. Elle est le siège du courant de défaut maximal, mais ce dernier se répartit entre les diverses plates-formes, en raison inverse de la résistance de leurs circuits de terre.

Au stade de l'étude préliminaire, le facteur d'atténuation correspondant doit être estimé, sa valeur exacte ne pouvant être déterminée qu'à l'issue du dimensionnement définitif et des modalités d'interconnexion de tous les circuits de terre du site. La nécessité de son ajustement justifie l'approche proposée, dans la mesure où le courant de défaut effectif joue le même rôle que la résistivité du sous-sol vis à vis de l'élévation des potentiels de sécurité.

Le tableau 1 regroupe les principales caractéristiques qui doivent être prises en compte lors du dimensionnement. La géométrie de la grille est imposée par les dimensions de la dalle rectangulaire (surface), et par la répartition des massifs de soutènement (le maillage doit être aussi régulier que possible et contourner les massifs).

Tableau 1: caractéristiques imposées

L (m)	l (m)	A (m^2)	D_m (m)	L_c (m)	L_p (m)	h (m)	t_f (ms)
33.5	19.5	653	2.26	634	106	0.60	50

La profondeur d'enfouissement de la grille est une valeur courante: elle réalise un compromis acceptable en terme d'efficacité: entre une profondeur infinie et une profondeur nulle (grille surfacique), sa résistance équivalente varie du simple au double, mais le gain obtenu au-delà de 1.5 m devient marginal.

Quant à la durée de passage du courant de défaut, elle dépend de la rapidité d'action des protections de surintensité et du temps de réponse des disjoncteurs assurant la coupure des circuits.

5.2 Configuration préliminaire

Le tableau 2 regroupe les paramètres retenus a priori en fonction des informations disponibles. Le facteur d'atténuation du courant de défaut (environ 60 %), de même que la résistivité moyenne ($50\Omega m$) sont estimés de manière assez conservatrice.

Tableau 2: caractéristiques préliminaires

N_r	l_r (m)	d_r (cm)	D_r (m)	$\bar{\rho}$ (Ωm)	I_G (kA)	I_g (kA)	R_e ($m\Omega$)
24	4.0	2.0	4.45	50	47	28	311

Ceci justifie le choix d'un nombre assez élevé de piquets (24), dont la longueur modérée (4m) serait compatible avec un coût d'insertion acceptable. En effet, des piquets courts peuvent être plantés dans le sol par percussion, contrairement à des piquets longs qui nécessitent la réalisation de forages plus coûteux.

Compte tenu de son importance, l'estimation de la résistivité moyenne a justifié une attention particulière.

5.2.1 Estimation de la résistivité moyenne

Le complexe industriel est implanté géographiquement sur un terrain proche d'une bordure côtière: le tableau 3 donne une idée de la stratification géologique verticale.

Tableau 3: stratification du sous-sol

N° couche	1	2	3	4	5
Nature Couche	Couche Remblai	Sable fin	Sédiment Marin	Gravier Humide	Eau De mer
Δh (m)	3.0	1.5	11.5	> 20	∞

La présence de l'eau de mer à grande profondeur (couche N°5) laisse supposer qu'elle remonte par capillarité jusqu'aux couches N° 4, voire N° 3.

Le tableau 4 récapitule les valeurs de résistivité issues du traitement de mesures réalisées sur 12 sondages. La méthode utilisée et sa mise en œuvre ne permettent pas d'estimer valablement la résistivité au-delà d'une profondeur de 4 m. L'analyse statistique de 24 mesures disponibles (2 mesures orthogonales par sondage) montre que le coefficient de variation de la résistivité est compris entre 25 et 50 %. Ceci résulte à la fois de l'imprécision de la méthode de mesure et de l'hétérogénéité du sous-sol.

Tableau 4: résistivité apparente

Δd (m)	1	2	3	4	ρ_{aw}^{\min}	ρ_{aw}^{moy}	ρ_{aw}^{\max}
ρ_{aw} (Ωm)	58.35	49.89	41.52	39.86	36.12	47.41	62.42
CV (%)	51	34	25	30	30	36	44

Comme indiqué dans le tableau 2, ces résultats nous ont conduit à retenir, pour l'étude préliminaire, une valeur moyenne égale à ($\bar{\rho} = 50\Omega m$).

Une telle valeur tendrait à confirmer que les couches N°2 et N°3 sont partiellement humidifiées (la résistivité d'un sable humidifié à 15 % par de l'eau douce serait environ 3 fois plus élevée, mais la salinité fait chuter cette valeur).

5.2.2 Elévation de potentiel & tensions de sécurité

En fonction de la résistance équivalente et du courant de court-circuit indiqués dans le tableau 2, l'élévation du potentiel de terre est très importante (cf. tableau 5)..

Tableau 5: tensions de sécurité

L_s (m)	K_i	K_s	E_s (kV)	GPR (kV)	$C \cdot \bar{\rho}$ 1000	E_s^a (kV)	$\frac{E_s}{E_s^a}$
821	1.51	0.67	1.725	8.71	0.30	0.913	1.89

Dans ces conditions, si la tension de "pas" effective est supérieure à la tension de "pas" admissible, il en sera nécessairement de même pour la tension de contact et il sera inutile de calculer cette dernière.

On constate que la valeur admissible de la tension de "pas" serait nettement dépassée (pratiquement doublée). Ceci confirme que la configuration préliminaire est inacceptable, car elle ne respecterait pas les exigences réglementaires en matière de sécurité électrique.

L'enjeu consiste donc à modifier cette configuration préliminaire en vue d'aboutir à une configuration définitive plus satisfaisante.

5.3 Configuration définitive

Les paramètres essentiels sur lesquels on peut agir sont les suivants:

- la résistivité du sous-sol,
- le facteur d'atténuation du courant de défaut,
- la résistance de terre via le réseau de piquets,
- les caractéristiques surfaciques de la dalle;

5.3.1 Profil de résistivité du sous-sol

Le tableau 6 montre que la résistivité locale, calculée à partir de mesures plus précises réalisées par la méthode de Wenner, diminue de façon monotone en fonction de la profondeur. A grande profondeur elle tend vers celle de l'eau de mer (taux de salinité: 25%), soit environ (0.2Ωm).

Tableau 6: résistivité locale

z (m)	1	2	4	8	16	32	64
$\rho(z)$ (Ωm)	38.8	34.5	26.5	14.3	3.72	0.86	0.74

Comme indiqué dans le tableau 7, il en est évidemment de même en ce qui concerne la résistivité moyenne.

Tableau 7: résistivité moyenne

z (m)	1	2	5	10	15	20	25
$\bar{\rho}(z)$ (Ωm)	40.8	38.7	32.7	23.5	18.3	14.4	11.6

Les approches de modélisation largement développées depuis plusieurs décennies et utilisées dans certains programmes de résolution numérique sont basées sur l'hypothèse d'un sous-sol équivalent à deux couches [17,18,19].

Dans notre cas, les valeurs du tableau conduiraient à assimiler le profil continu de résistivité à un profil discontinu: soit une couche supérieure d'épaisseur égale à 6.60 m et de résistivité constante (43.3Ωm) et une couche inférieure d'épaisseur infinie et de résistivité constante (0.74Ωm).

Sans vouloir remettre en cause la validité de cette équivalence en termes de résultats[20], l'importance de cette discontinuité est peu compatible avec la réalité physique, d'autant que la profondeur caractéristique associée à la boucle excède largement l'épaisseur de la première couche virtuelle.

C'est l'une des raisons, jointe au fait que la résistivité est rarement connue avec la précision souhaitable, qui nous a conduit à la démarche utilisée ici.

Par rapport à la valeur initialement retenue pour l'étude de la configuration préliminaire, on pourra obtenir une réduction substantielle de la résistance de terre et des tensions de sécurité.

5.3.2 Autres modifications

La sous-station électrique fait partie d'un vaste ensemble de plates-formes mutuellement interconnectées. L'étude conjointe de la configuration préliminaire de ces dernières et de la topologie générale des circuits a conduit à réviser le coefficient d'atténuation du courant de défaut. Ce dernier est nettement plus faible, qu'auparavant, ce qui résulte d'un transfert plus important du courant de défaut maximal vers les circuits de terre des autres plates-formes.

En outre, la décroissance de la résistivité avec la profondeur est un facteur favorable à l'allongement de la longueur des piquets. Corrélativement, leur nombre ainsi que leur diamètre ont pu être réduits sans que la résistance équivalente du réseau de piquets en soit affectée.

Enfin, la prise en compte de la résistivité surfacique de la dalle en béton a permis de majorer significativement les tensions de sécurité admissibles.

Tableau 8: caractéristiques définitives

N_r	l_r (m)	d_r (cm)	D_r (m)	I_G (kA)	I_g (kA)	R_e (mΩ)	GPR (kV)
6	6	1.5	18	44	6.6	232	1.531

La comparaison entre les tableaux 8 et 2 fait apparaître des gains significatifs, dans les rapports suivants:

- résistance de terre équivalente: 3/4,
- nombre de piquets: 1/4,
- volume de cuivre des piquets: 1/5 ;

5.3.3 Elévation de potentiel & tensions de sécurité

On peut voir, en comparant les tableaux 8 et 5, que l'élévation du potentiel de terre a pu être considérablement réduite, grâce à la diminution conjointe du courant de défaut effectif et de la résistance de terre équivalente.

Quant aux tensions de sécurité effectives, elles sont dorénavant plus faibles que les tensions admissibles (cf. tableau 9).

Tableau 9: tensions de sécurité

L_m (m)	K_i	K_t	E_t (kV)	$\frac{C \cdot \rho}{1000}$	E_t^a (kV)	$\frac{E_t}{E_t^a}$	$\frac{E_s}{E_s^a}$
727	2.45	0.45	0.405	1.65	1.859	0.22	0.13

Comme indiqué précédemment, c'est bien la tension de "contact" qui conditionne le dimensionnement définitif du circuit de terre, vis à vis des exigences de sécurité électrique.

5.3.4 Analyse du risque d'électrocution

Le risque d'électrocution encouru dépend de la marge existant entre les tensions de "contact" assignée et effective. Une évaluation réaliste du risque implique de considérer ces deux niveaux de tension comme des variables aléatoires.

En ce qui concerne le niveau de tension admissible, sa variabilité statistique résulte essentiellement du comportement humain vis à vis des courants électriques. Les résultats expérimentaux obtenus par [8] montrent que le seuil de fibrillation cardiaque est une variable aléatoire ayant un coefficient de variation de l'ordre de 25 %.

Quant au niveau de tension effectif, il résulte d'un calcul faisant intervenir un grand nombre de paramètres. Parmi ceux-ci, l'influence de la résistivité moyenne du sous-sol l'emporte largement sur celle des autres paramètres, la plupart d'entre eux étant de nature géométrique.

La variabilité naturelle du sous-sol présente de multiples aspects et l'hypothèse habituelle d'un sol stratifié horizontalement en couches homogènes est quelquefois assez éloignée de la réalité. A titre indicatif, les résultats du tableau 6 représentent des valeurs moyennes qui s'écartent des valeurs mesurées de 10 % environ (écart quadratique). Ces valeurs, observées sur une zone localisée du site, peuvent être comparées à celles qui résultent d'un ensemble de points dispersés sur la surface du site. Ainsi, entre les tableaux 6 et 4, la variabilité spatiale se traduit par une augmentation significative du coefficient de variation, lequel peut atteindre 50 %.[21].

En considérant que les deux tensions sont réparties suivant des lois normales définies par leurs moyennes (μ_e, μ_a) et les coefficients de variation correspondants (γ_e, γ_a), le risque de dépassement du niveau de tension admissible est une probabilité calculable par convolution:

$$\Pr(E_t > E_t^a) = 1 - \Phi(u) \quad (13)$$

Dans cette expression, $\Phi(u)$ est l'intégrale de Laplace de la variable (u) définie par:

$$u = [1 - (\mu_e / \mu_a)] / \gamma_a \cdot \sqrt{1 + (\gamma_e \cdot \mu_e / \gamma_a \cdot \mu_a)^2} \quad (14)$$

Compte tenu du rapport des moyennes (0.22) et des coefficients de variation considérés ci-dessus (25 & 50 %), le risque d'électrocution serait de l'ordre de 0.21 %.

Il s'agit d'un ordre de grandeur qui correspond au cas où une personne entrerait en contact avec une pièce métallique au moment du défaut.

En fait, le risque réel est nettement plus faible, car cette valeur doit être multipliée par la probabilité qu'une personne soit exposée à ce risque. Cette probabilité de coïncidence dépend des conditions d'exploitation spécifiques du complexe industriel considéré.

6. Conclusions & perspectives

Dans les activités professionnelles concernées par l'utilisation de l'énergie électrique, la fréquence des accidents par électrocution est relativement faible. En contrepartie, leur gravité est importante, ce qui justifie que le risque correspondant soit ramené à une valeur aussi faible que possible.

Les nombreuses installations dont le neutre est relié à la terre sont le siège, en cas de défaut, de surtensions dont le niveau doit être limité à des valeurs non dangereuses. Sur le plan technique, une parade efficace consiste à équiper les sous-stations d'un circuit de terre capable d'assurer la diffusion des courants de défaut dans le sous-sol.

Toutefois, la conception et le dimensionnement d'un circuit de terre se heurte à de nombreuses difficultés, dont la principale concerne la prise en compte de la résistivité du sous-sol. Les méthodes de calcul numérique relatives au dimensionnement électromagnétique des circuits de terre ont atteint un degré de maturité satisfaisant, mais la précision ainsi obtenue est fréquemment annihilée par la méconnaissance de la variabilité du sous-sol.

Nous proposons une démarche alternative qui consiste à utiliser une méthode de calcul analytique associée à une analyse plus approfondie des caractéristiques géologiques du sous-sol. Certes, on perd un peu en précision sur le plan du dimensionnement électrique, mais ceci est largement compensé par une prise en compte plus réaliste de la résistivité, liée à la stratification du sous-sol.

Dans la logique de cette démarche, nous proposons d'exploiter les résultats ainsi obtenus en considérant, outre le respect de niveaux de surtensions réglementaires, leur extension en terme de probabilité d'accident par électrocution. Cette orientation entre dans une optique d'analyse de risque, permettant de quantifier une probabilité en tenant compte simultanément des variabilités relatives aux niveaux des surtensions et à la résistance du corps humain vis à vis des chocs électriques.

Compte tenu des faibles probabilités d'accidents par électrocution actuellement observées, cette orientation est favorable à la recherche d'améliorations quantifiables.

Le cas d'application présenté correspond à des situations typiques, fréquemment rencontrées. Parmi les nombreuses voies d'améliorations possibles, on peut citer par exemple: l'utilisation du ferrailage des dalles et des piliers de soutènement en béton armé, de pieux très profonds capables de faire remonter l'humidité par capillarité, de matériaux de remplissage artificiels, de fracture par explosion des sous-sols rocheux, etc...toutes dispositions envisageables sur des sites naturels.

Annexe: Liste des symboles & notations

Symbole	Définition	Unité
L	Longueur de la grille rectangulaire	m
l	Largeur de la grille rectangulaire	m
A	Surface de la grille	m^2
D_m	Dimension moyenne de la maille	m
L_p	Périmètre de la grille	m
L_c	Longueur cumulée des conducteurs	m
h	Profondeur enfouissement grille	m
N_r	Nombre de piquets	SD
l_r	Longueur d'un piquet	m
d_r	Diamètre d'un piquet	cm
D_r	Intervalle moyen entre 2 piquets	m
I_G	Courant de défaut maximal	kA
I_g	Courant de défaut effectif	kA
t_f	Durée de passage du courant	ms
$\bar{\rho}$	Résistivité spatiale moyenne	Ωm
ρ_{aw}	Résistivité apparente de Wenner	Ωm
z	Coordonnée verticale	m
$\rho(z)$	Résistivité locale en profondeur	Ωm
$\bar{\rho}(z)$	Résistivité moyenne en profondeur	Ωm
ρ_s	Résistivité surfacique de la dalle	Ωm
Δh	Épaisseur couche géologique	m
Δd	Distance entre électrodes de mesure	m
CV	Coefficient de variation	SD
R_g	Résistance équivalente de la grille	$m\Omega$
R_l	Résistance équivalente de la boucle	$m\Omega$
R_{gl}	Résistance équivalente grille-boucle	$m\Omega$
R_{r1}	Résistance équivalente d'un piquet	$m\Omega$
R_r	Résistance équivalente des piquets	$m\Omega$
R_m	Résistance mutuelle grille-piquets	$m\Omega$
R_e	Résistance équivalente de terre	$m\Omega$
GPR	Élévation du potentiel de terre	kV
E_j	Tension de sécurité effective	kV
E_j^a	Tension de sécurité admissible	kV
C_s	Coefficient de résistivité surfacique	SD
$F_{j=(t,s)}$	Facteur de résistance corporelle	SD
K_i	Coefficient d'irrégularité de la grille	SD
$K_{j=(t,s)}$	Facteur géométrique du circuit	SD
$L_{j=(t,s)}$	Longueur caractéristique	m
$\bar{\rho}_j$	Résistivité moyenne d'indice (j)	Ωm
$C(\bullet)$	Coefficient de correction	SD
$F(\bullet)$	Facteur d'influence	SD
(s)	Indice pour tension "de pas"	
(t)	Indice pour tension de "contact"	

Références

- [1] *Guide for Safety in AC Substation Grounding*, IEEE Standard 80-2000.
- [2] J. P. Nelson, *System Grounding and Ground-Fault Protection in the Petrochemical Industry: A Need for a Better Understanding*, IEEE Trans., IA-38, N° 6, 1633-1640, Nov./Dec. 2002.
- [3] L. C. Peterson, *Problems with Large Ground Fault Currents in Utility Substations in or near Industrial Sites*, IEEE Trans., IA-9, N° 6, 680-686, Nov./Dec. 1973.
- [4] S.D. Jacimovic, *Maximum Permissible Values of Step and Touch Voltages with Special Considerations to Electrified Railroads*, IEEE Trans., IA-20, N° 4, 935-941, July/august 1984.
- [5] G. Parise & al., *Electrical Safety for Employee Workplaces in Europe and in the USA*, IEEE Trans. IA-41, N° 4, 1091-1098, July/August 2005.
- [6] *Code of practice for Earthing*, British Standard BS 7430-1998.
- [7] J. R. Dunki-Jacobs, C. St. Pierre, *The function and composition of the global industrial grounding system*, IEEE Trans., IA-42, N°1, 172-185, January/February 2006.
- [8] C. F. Dalziel, W. R. Lee, *Re-evaluation of Lethal Electric Currents*, IEEE Trans. IGA-4, N°5, 467-476, Oct. 1968.
- [9] C. F. Dalziel, *Electrical shock hazard*, IEEE Spectrum, 41-50, February 1972.
- [10] U. G. Biegelmeier, W. R. Lee, *New considerations on the threshold of ventricular fibrillation for AC shocks at 50-60 Hz*, Proc. IEEE, 127, 103-110, 1980.
- [12] J. G. Sverak, *Progress in Step and Touch Voltage Equations of ANSI/IEEE Std 80- Historical Perspective*, IEEE Trans. , PD-13, N° 3, 762-767, July 1998.
- [13] C. F. Tagg, *Multiple-driven-rod earth connection*, IEE Proc., 127, Pt. C, N° 4, 240-247, 1980.
- [14] C.J. Blattner, F. Dawalibi, *Earth Resistivity Measurement Interpretation Techniques*, IEEE Trans. PAS-103, N° 2, 374-382, February 1984.
- [15] A. P. Meliopoulos & al., *Estimation of soil parameters from driven-rod measurement*, IEEE Trans., PD-103, N° 9, Sept. 1994.
- [16] L. Pierrat, *Design and calculation of a large substation grounding system*, Internal Report, LJ-Consulting, July 2008.

- [17] R. J. Heppe, *Step Potential and Body Currents near Grounds in Two-layer Earth*, IEEE Trans., PAS-98, N° 1, 45-59, Jan./Febr. 1979.
- [18] M.M.A. Salama & al., *A formula for resistance of substation grounding grid in two-layer soil*, IEEE Trans., PD-10, N° 3, 1255-1262, July 1995.
- [19] M.M.A. Salama & al., *Surface voltages and resistance of grounding systems of grid and rods in two-layer earth by rapid Galerkin's method*, IEEE Trans. PD-12, N° 1, 179-185, January 1997.
- [20] F. Dawalibi & al., *Equivalence of uniform and two-layer soils to multilayer soils in the analysis of grounding systems*, IEE Proc. Gen., Trans., Distrib., 143, N° 1, 49-55, January 1996.
- [21] S.M. Berlijn & al., *The measurement uncertainty in and practically of measurement of soil resistivity and grounding resistance*, Int. Symp. On High Voltage Engrg, T10-31, Ljubljana, Slovenia, August 2007.