



UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

UIT-T

SECTEUR DE LA NORMALISATION
DES TÉLÉCOMMUNICATIONS
DE L'UIT

K.57

(09/2003)

SÉRIE K: PROTECTION CONTRE LES
PERTURBATIONS

**Mesures de protection des stations de base
radioélectriques installées sur des pylônes
électriques**

Recommandation UIT-T K.57

Recommandation UIT-T K.57

Mesures de protection des stations de base radioélectriques installées sur des pylônes électriques

Résumé

La présente Recommandation spécifie les mesures à prendre en matière de sécurité et concernant les risques de dommages matériels liés à l'élévation du potentiel de terre en cas d'utilisation des pylônes des lignes de transport d'énergie électrique pour installer des stations de base de radiocommunication. La présente Recommandation traite également des dispositions spéciales de protection contre la foudre de ces installations.

Cet aspect est particulièrement préoccupant lorsque l'alimentation électrique de la station est assurée par le réseau basse tension. Les différentes options envisageables sont présentées.

Trois appendices sont joints à la Recommandation.

L'Appendice I, intitulé "Guide sur la coordination du niveau d'isolement nécessaire aux circuits d'alimentation électrique et de l'élévation du potentiel de terre du pylône", fournit des indications quant au calcul du niveau d'isolement prescrit du fait de l'élévation du potentiel de terre au niveau d'un défaut de terre du pylône.

On trouvera à l'Appendice II, intitulé "Guide sur la configuration de l'alimentation BT", des précisions concernant les options d'alimentation BT.

Enfin l'Appendice III, intitulé "Caractérisation et limitation de la zone d'élévation du potentiel de terre du dispositif de terre du pylône et estimation de la longueur minimale de la section de connexion", présente des calculs simples d'estimation de l'élévation du potentiel de terre visant à déterminer la longueur du câble dit de connexion.

Il contient en outre des diagrammes représentant l'élévation du potentiel de terre et la tension de toucher, en cas d'installation de réseaux de terre à cadre de répartition du potentiel autour de l'armoire d'équipement.

Source

La Recommandation K.57 de l'UIT-T a été approuvée le 6 septembre 2003 par la Commission d'études 5 (2001-2004) de l'UIT-T selon la procédure définie dans la Recommandation UIT-T A.8.

AVANT-PROPOS

L'UIT (Union internationale des télécommunications) est une institution spécialisée des Nations Unies dans le domaine des télécommunications. L'UIT-T (Secteur de la normalisation des télécommunications) est un organe permanent de l'UIT. Il est chargé de l'étude des questions techniques, d'exploitation et de tarification, et émet à ce sujet des Recommandations en vue de la normalisation des télécommunications à l'échelle mondiale.

L'Assemblée mondiale de normalisation des télécommunications (AMNT), qui se réunit tous les quatre ans, détermine les thèmes d'étude à traiter par les Commissions d'études de l'UIT-T, lesquelles élaborent en retour des Recommandations sur ces thèmes.

L'approbation des Recommandations par les Membres de l'UIT-T s'effectue selon la procédure définie dans la Résolution 1 de l'AMNT.

Dans certains secteurs des technologies de l'information qui correspondent à la sphère de compétence de l'UIT-T, les normes nécessaires se préparent en collaboration avec l'ISO et la CEI.

NOTE

Dans la présente Recommandation, l'expression "Administration" est utilisée pour désigner de façon abrégée aussi bien une administration de télécommunications qu'une exploitation reconnue.

Le respect de cette Recommandation se fait à titre volontaire. Cependant, il se peut que la Recommandation contienne certaines dispositions obligatoires (pour assurer, par exemple, l'interopérabilité et l'applicabilité) et considère que la Recommandation est respectée lorsque toutes ces dispositions sont observées. Le futur d'obligation et les autres moyens d'expression de l'obligation comme le verbe "devoir" ainsi que leurs formes négatives servent à énoncer des prescriptions. L'utilisation de ces formes ne signifie pas qu'il est obligatoire de respecter la Recommandation.

DROITS DE PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

L'UIT attire l'attention sur la possibilité que l'application ou la mise en œuvre de la présente Recommandation puisse donner lieu à l'utilisation d'un droit de propriété intellectuelle. L'UIT ne prend pas position en ce qui concerne l'existence, la validité ou l'applicabilité des droits de propriété intellectuelle, qu'ils soient revendiqués par un Membre de l'UIT ou par une tierce partie étrangère à la procédure d'élaboration des Recommandations.

A la date d'approbation de la présente Recommandation, l'UIT n'avait pas été avisée de l'existence d'une propriété intellectuelle protégée par des brevets à acquérir pour mettre en œuvre la présente Recommandation. Toutefois, comme il ne s'agit peut-être pas de renseignements les plus récents, il est vivement recommandé aux responsables de la mise en œuvre de consulter la base de données des brevets du TSB.

© UIT 2004

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans l'accord écrit préalable de l'UIT.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
1 Domaine d'application	1
2 Références normatives.....	1
3 Définitions et abréviations.....	2
3.1 Définitions	2
3.2 Abréviations	2
4 Généralités	2
4.1 Caractérisation des défauts de terre des systèmes d'alimentation électrique directement mis à la terre	3
4.2 Caractérisation d'un défaut de terre sur les systèmes d'alimentation électrique non directement mis à la terre.....	3
4.3 Elévation du potentiel de terre (EPR, <i>earth potential rise</i>).....	3
5 Alimentation électrique	4
5.1 Alimentation à partir du réseau BT	4
5.2 Alimentation à partir d'un réseau MT.....	9
5.3 Alimentation à partir de la ligne HT.....	9
6 Exigences concernant le système d'antenne	9
7 Câbles de télécommunication	10
8 Systèmes de mise à la terre.....	10
9 Installation et entretien	10
10 Exemples d'installation.....	11
Appendice I – Guide sur la coordination du niveau d'isolement nécessaire aux circuits d'alimentation électrique et de l'élévation du potentiel des pylônes électriques.....	13
I.1 Champ de l'étude	13
I.2 Options étudiées – Paramètres.....	13
I.3 Analyse des résultats	16
I.4 Estimation du niveau d'isolement requis	31
Appendice II – Guide sur le dispositif d'alimentation BT	35
II.1 Dispositif d'alimentation BT	35
II.2 Principes de protection	36
II.3 Choix des valeurs nominales adoptées pour les dispositifs de protection.....	38
II.4 Options d'alimentation de plusieurs stations de base de radiocommunication	40
Appendice III – Caractérisation et limitation de la zone EPR du réseau de terre des pylônes et estimation de la longueur minimale de la section de connexion.....	42
III.1 Caractérisation de la zone EPR de la prise de terre des pylônes	42
III.2 Limitation des tensions de toucher et de pas au moyen de dispositifs de terre PGE à répartition du potentiel.....	46
III.3 Estimation des longueurs minimales	57

Recommandation UIT-T K.57

Mesures de protection des stations de base radioélectriques installées sur des pylônes électriques

1 Domaine d'application

La présente Recommandation spécifie les mesures à prendre en matière de sécurité et concernant les risques de dommages matériels liés à l'élévation du potentiel de terre en cas d'utilisation des pylônes des lignes de transport d'énergie électrique pour y installer des stations de base de radiocommunication.

La présente Recommandation traite également des dispositions spéciales de protection contre la foudre de ces installations.

Elle tient compte conjointement de l'alimentation électrique et du raccordement au réseau de télécommunication.

Par ailleurs, elle fait état du risque de perturbation de l'antenne émettrice.

La protection contre la foudre des stations de base de radiocommunication est traitée dans la Rec. UIT-T K.56.

2 Références normatives

La présente Recommandation se réfère à certaines dispositions des Recommandations UIT-T et textes suivants qui, de ce fait, en sont partie intégrante. Les versions indiquées étaient en vigueur au moment de la publication de la présente Recommandation. Toute Recommandation ou tout texte étant sujet à révision, les utilisateurs de la présente Recommandation sont invités à se reporter, si possible, aux versions les plus récentes des références normatives suivantes. La liste des Recommandations de l'UIT-T en vigueur est régulièrement publiée. La référence à un document figurant dans la présente Recommandation ne donne pas à ce document, en tant que tel, le statut d'une Recommandation.

- Recommandation UIT-T K.8 (1988), *Séparation dans le sol entre câbles de télécommunications et mise à la terre des installations de transport d'énergie.*
- Recommandation UIT-T K.33 (1996), *Limites assurant la sécurité des personnes en cas de couplage induit dans un système de télécommunication par un défaut dans une installation de transport d'énergie électrique ou dans une installation ferroviaire électrifiée (en courant alternatif).*
- Recommandation UIT-T K.52 (2000), *Directives concernant les valeurs limites d'exposition des personnes aux champs électromagnétiques.*
- Recommandation UIT-T K.56 (2003), *Protection des stations de base radioélectriques contre la foudre.*
- CEI 61643-1 (2002-01), *Dispositifs de protection contre les surtensions connectés aux réseaux de distribution basse tension – Partie 1: Prescriptions de fonctionnement et méthodes d'essai.*
- CEI 61643-12 (2002-02), *Parafoudres basse tension – Partie 12: Parafoudres connectés aux réseaux de distribution basse tension – Principes de choix et d'application.*

3 Définitions et abréviations

3.1 Définitions

La présente Recommandation définit les termes suivants:

3.1.1 terre de répartition du potentiel (PGE, *potential grading earth*): réseau d'électrodes installé à faible profondeur autour des armoires d'équipement afin de limiter la tension de pas et la tension de toucher. Il est mis à la masse du pylône et de la terre de l'armoire.

3.1.2 système d'alimentation directement mis à la terre: système d'alimentation HT et MT, dont le neutre est raccordé à la terre soit directement, soit par une faible impédance.

3.1.3 système d'alimentation indirectement mis à la terre: système d'alimentation HT et MT dont le neutre est raccordé à la terre par une forte impédance (résistance ou inductance) ou par une bobine d'extinction d'arc (Petersen) ou dont le neutre est isolé.

3.2 Abréviations

La présente Recommandation utilise les abréviations suivantes:

BT	basse tension (tension inférieure à 1000 V c.a.) (<i>low voltage</i>)
EPR	élévation du potentiel de terre (<i>earth potential rise</i>)
HT	haute tension (tensions supérieures à 100 kV c.a.) (<i>high voltage</i>)
MOV	varistor MOS (<i>metal oxide varistor</i>)
MT	moyenne tension (tensions comprises entre les BT et HT) (<i>medium voltage</i>)
RBS	station de base de radiocommunication (<i>radio base station</i>)
SPD	dispositif de protection contre les surtensions (ou parafoudre) (<i>surge protective device</i>)
T-EPR	élévation du potentiel de terre de pylône (<i>tower-earthing potential rise</i>)
Z-EPR	zone d'élévation du potentiel de terre (<i>zone of the earth potential rise</i>)

4 Généralités

L'installation des antennes de stations de base de radiocommunication sur les pylônes des lignes d'énergie électrique est surtout intéressante dans les zones rurales ou en l'absence d'immeuble de grande hauteur offrant la possibilité d'y installer des antennes. D'autre part, certaines précautions sont indispensables de façon à assurer la sécurité de l'installation et à ne pas endommager l'équipement.

Sur chaque pylône de ligne d'énergie électrique comportant une antenne de station de base de radiocommunication, il y a un coffret situé à proximité du pylône ou entre les pieds du pylône si possible à une certaine hauteur. L'emplacement de l'armoire ne pose pas un problème de sécurité, mais plutôt d'accessibilité au pylône.

L'armoire contient des équipements d'émission et de réception; elle est munie de raccordements d'alimentation électrique et de transmission du signal.

Un coffret transformateur d'alimentation électrique se trouve à proximité immédiate de l'armoire d'équipement ou dans une partie de celle-ci réservée à cet effet.

Il est possible d'installer l'antenne au-dessous ou au-dessus des conducteurs de phase ou même au-dessus de câbles de terre suspendus, le cas échéant.

La ligne d'énergie électrique peut faire partie d'un système d'alimentation électrique directement ou non mis à la terre.

Il faut prendre en considération deux phénomènes:

- la montée en potentiel de terre en cas de défaut de terre au niveau du pylône – Ce problème est résolu en isolant la partie du matériel de la station de base radio qui comporte des connexions métalliques extérieures, par rapport à l'armoire et au matériel, qui est mis à la masse du pylône;
- la foudre frappant le pylône – Ce problème est résolu en établissant des liaisons équipotentielles entre les parties susmentionnées de la station de base, grâce à des dispositifs appropriés de protection contre les surtensions pour ne pas détériorer l'isolation en cas de montée en potentiel de terre.

Des indications plus détaillées figurent au § II.2.

4.1 Caractérisation des défauts de terre des systèmes d'alimentation électrique directement mis à la terre

Lorsqu'un défaut de terre apparaît dans un système d'alimentation électrique avec un neutre directement mis à la terre, on observe une montée en potentiel de terre, au niveau des sous-stations électriques, mais aussi au niveau du défaut proprement dit, le cas échéant au niveau du pylône, sur lequel la station de base radio est installée. Dans la plupart des cas, l'élévation du potentiel de terre sera nettement plus élevée au niveau du défaut, parce que l'impédance équivalente par rapport à la terre en ce point est largement supérieure à celle observée au niveau des sous-stations

Des indications plus détaillées figurent à l'Appendice I.

4.2 Caractérisation d'un défaut de terre sur les systèmes d'alimentation électrique non directement mis à la terre

Lorsqu'un défaut de terre apparaît dans un système d'alimentation électrique dont le neutre n'est pas directement mis à la terre, la montée en potentiel de terre sera très faible en raison de la faible amplitude du courant de défaut. Toutefois, des défauts de terre peuvent également apparaître en deux points; le courant de défaut sera alors nettement plus intense et provoquera une forte montée en potentiel de terre au niveau des deux défauts.

4.3 Elévation du potentiel de terre (EPR, *earth potential rise*)

Lorsque apparaît un défaut de terre simple sur une ligne d'énergie électrique d'un réseau avec le neutre directement mis à la terre, ou un défaut de terre double sur une ou des lignes d'énergie électrique d'un réseau dont le conducteur neutre n'est pas directement mis à la terre, il se produit une forte montée en potentiel de terre, pouvant atteindre des dizaines de kV au niveau du pylône. Le terme désigne généralement deux sortes d'élévation du potentiel, tel qu'indiqué ci-après.

4.3.1 Elévation du potentiel de terre du pylône (T-EPR, *tower-earthing potential rise*)

L'élévation du potentiel du pylône désigne le potentiel de la terre (semelle) du pylône par rapport à la terre éloignée, au cours d'un défaut de terre.

L'amplitude de l'élévation du potentiel de terre du pylône dépend d'un certain nombre de facteurs notamment:

- a) l'amplitude du courant de défaut de terre;
- b) la résistance de terre du poteau (pôle);
- c) fils de terre aériens et souterrains le cas échéant;
- d) distance par rapport aux stations électriques d'alimentation;
- e) espacement des pylônes.

Les facteurs mentionnés aux paragraphes e) et d) ont une importance secondaire.

NOTE 1 – Lorsque la ligne d'énergie électrique est équipée de fils de terre aériens ou souterrains, la plus grande partie du courant de défaut chemine par ces fils, et seule une fraction du courant de défaut de terre circule par la semelle du pylône. L'élévation du potentiel de terre du pylône peut être caractérisée par le produit de cette fraction ($3I_{0E}$) de la composante homopolaire ($3I_0$) du courant de défaut de terre qui traverse la semelle du pylône et de la résistance de mise à la terre (R) du pylône, c'est-à-dire $3I_{0E}R$.

Il est possible de calculer l'élévation T-EPR ou de préférence de la mesurer, afin de déterminer, si des dispositions spéciales sont inutiles, ce qui est rare (voir Appendice I).

NOTE 2 – Si la ligne d'énergie électrique n'est pas équipée de fils de terre, alors la totalité du courant de défaut circule par la semelle du pylône. L'élévation T-EPR peut être calculée comme égale au produit de la composante homopolaire ($3I_0$) du courant de défaut de terre et de la résistance de terre (R) du pylône, c'est-à-dire $3I_0R$.

Il faut calculer l'élévation T-EPR pour chaque cas particulier en tenant compte des conditions réelles propres au pylône sur lequel la station de base est installée.

4.3.2 Zone d'élévation du potentiel de terre (Z-EPR)

La zone d'élévation du potentiel de terre (Z-EPR, *zone of the earth potential rise*) désigne la zone située autour du pylône de la ligne d'énergie électrique à l'intérieur de laquelle apparaît un potentiel de terre par rapport à la terre éloignée, dans le cas d'un courant de défaut de terre monophasé, ou d'un courant de défaut de terre double en présence d'un réseau qui n'est pas directement mis à la terre. Lorsqu'on s'éloigne de la semelle du pylône ce potentiel retombe plus ou moins rapidement au niveau du potentiel de terre ("entonnoir de potentiel"), selon des modalités qui dépendent des facteurs suivants:

- a) importance de l'élévation du potentiel T-EPR à l'origine de la zone Z-EPR;
- b) géométrie (étendue et structure) du système de mise à la terre;
- c) caractéristiques du sol (nature géologique, stratification, etc.).

L'Appendice III contient des indications plus détaillées concernant les caractéristiques de la zone Z-EPR.

5 Alimentation électrique

Il est possible d'assurer de l'une des façons suivantes l'alimentation électrique de la station de base radio:

- 1) A partir du réseau BT, par un transformateur d'isolement, afin de séparer du voisinage la zone EPR. Cette solution est la plus courante.
- 2) A partir d'un réseau d'alimentation MT. Dans ce cas, on peut utiliser le transformateur MT/BT comme transformateur d'isolement entre la zone EPR et la zone voisine.
- 3) A partir de la ligne d'énergie électrique HT proprement dite, par exemple à travers un diviseur de tension capacitif ou par une boucle à couplage inductif. Cette méthode est coûteuse et rarement utilisée, si tant est qu'elle le soit.

Des informations plus détaillées figurent à l'Appendice II.

5.1 Alimentation à partir du réseau BT

La Figure 1 présente la configuration des installations, lorsque l'armoire d'équipement est alimentée à partir du réseau BT.

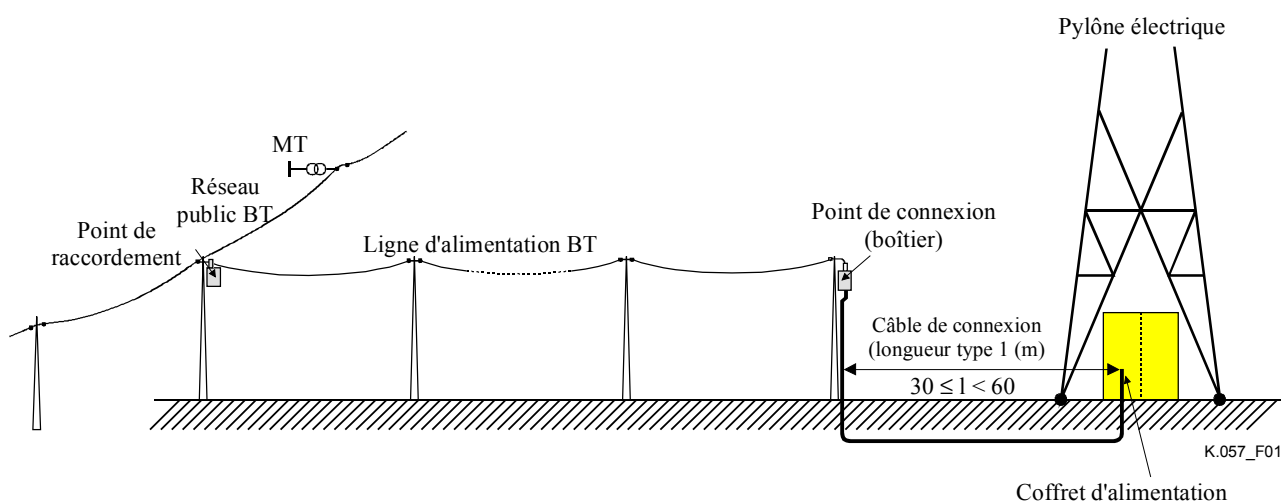


Figure 1/K.57 – Configuration type de l'alimentation BT

Hormis les indications correspondant aux différentes options décrites ci-dessous, les règles suivantes doivent être observées:

- le câble ne doit pas être agrafé sur des éléments mis à la terre du coffret du transformateur;
- l'arrivée du câble vers l'armoire doit être perpendiculaire à la ligne d'énergie électrique afin d'éviter les tensions induites;
- lorsqu'il est impossible d'enfouir des câbles dans le sol, on peut dans certains cas installer un câble aérien;
- pour protéger le réseau BT, d'autres dispositions sont indispensables; leur mise en œuvre peut être exigée de l'exploitant du réseau BT;
- un câble BT dans une conduite plastique peut être remplacé par un câble MT muni du niveau d'isolement requis pour l'alimentation électrique. Ce câble doit être installé à au moins 50 m du pylône. Le câble MT ne doit contenir aucun écran; autrement dit il doit être construit sans écran en vue de cette utilisation.

Les dispositions de protection applicables, par exemple le mode de connexion et le choix des dispositifs limiteurs de surtension, dépendent dans une large mesure de la configuration d'alimentation, en particulier de la structure du câble de connexion qui, avec le transformateur d'isolement, sont conjointement protégés par les dispositifs SPD dont le coffret d'alimentation de la RBS est équipé.

5.1.1 Options quant à la structure du câble de connexion

Le câble de connexion appartient à l'une des deux grandes catégories suivantes selon l'absence ou la présence d'un écran. Bien que la solution d'un câble souterrain soit préférable, il peut s'agir d'un câble aérien.

5.1.1.1 Câble de connexion sans écran métallique ni conducteur neutre

Dans ce cas, les parties métalliques du câble sont constituées uniquement des conducteurs des trois phases. Les pointes de tension (chocs dus à la foudre et élévation du potentiel à 50 Hz) interviennent entre les conducteurs de phase et la terre. Les différentes façons d'assurer une isolation appropriée par rapport à la terre sont les suivantes:

- a) câble BT à trois conducteurs avec isolation renforcée par rapport à la terre. L'isolation supplémentaire doit être obtenue grâce à une gaine isolante autour du câble, ou en installant le câble de connexion dans un tube isolant étanche;

- b) câble MT sans écran métallique. Dans ce cas, l'isolation requise par rapport à la terre est obtenue essentiellement grâce à l'isolant proprement dit de l'âme du câble, qui est renforcé par son revêtement en plastique (gaine).

NOTE 1 – Un câble MT prévu pour le niveau de tension prescrit (10 kV au moins) est généralement réalisé avec des fils écrans métalliques. Un câble sans écran est réalisable, mais sur commande spéciale.

NOTE 2 – Le câble MT requis peut être constitué de trois câbles à conducteur simple (généralement pour les niveaux de tension de 20 kV au moins).

5.1.1.2 Câble de connexion avec écran métallique ou conducteur neutre

Dans ce cas, on utilise normalement un câble BT à trois conducteurs, avec un écran de cuivre concentrique autour du faisceau central. En cas d'utilisation d'un câble BT blindé à quatre conducteurs, le conducteur neutre doit être mis au potentiel de l'écran aux extrémités du câble de connexion. Conformément aux principes de protection, l'écran est mis à la terre au niveau du point de connexion (hors de la zone EPR), de telle sorte que les surtensions (dus à la foudre et à l'élévation du potentiel à 50 Hz) se produisent entre l'écran et la terre, en particulier au voisinage du pylône. L'isolation requise par rapport à la terre doit être obtenue en équipant le câble d'une gaine plastique supplémentaire ou en installant le câble de connexion dans un tube isolant étanche.

NOTE – L'écran achemine le courant de surtension détourné par le parafoudre MT; il doit avoir une section transversale totale d'au moins 35 mm².

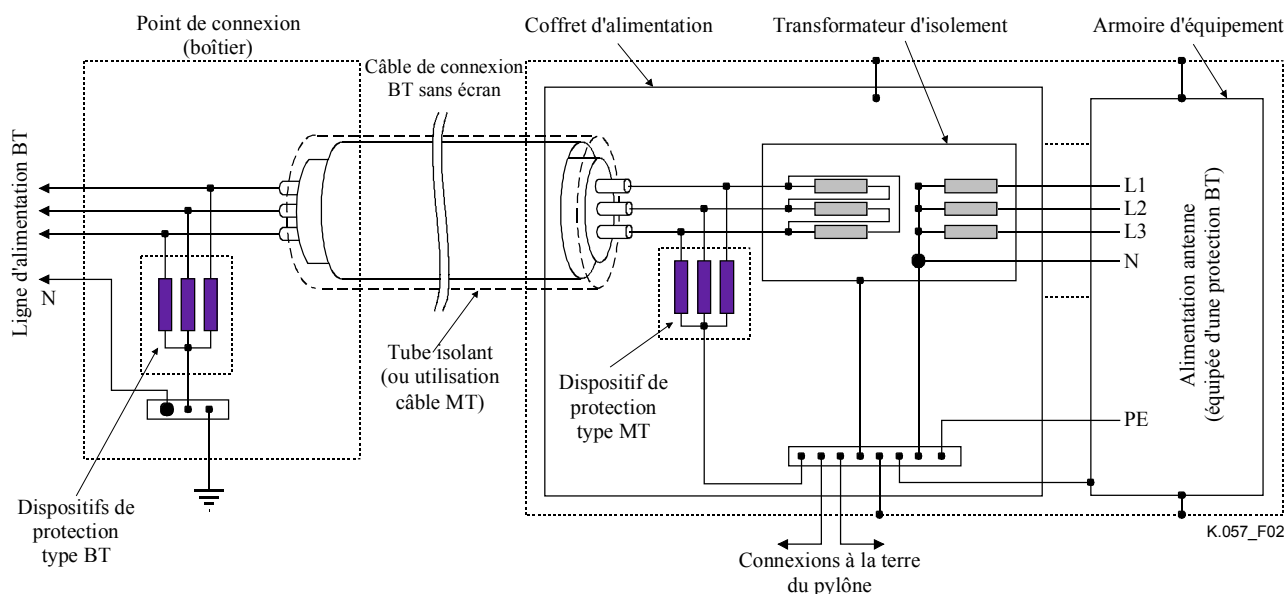
5.1.2 Schémas de protection au niveau du coffret d'alimentation et du point de connexion

Les trois options recommandées correspondent aux différentes configurations d'alimentation.

5.1.2.1 Câble de connexion sans écran métallique, ni conducteur neutre

En ce qui concerne les câbles de jonction sans écran métallique, ni conducteur neutre, les modalités de connexion des dispositifs SPD sont les suivantes (voir Figure 2, Option 1):

- 1) au niveau du coffret d'alimentation, le dispositif SPD MT (par exemple, MOV) est installé entre le conducteur de chaque phase et la terre du pylône;
- 2) au niveau du point de connexion, le dispositif SPD BT est installé entre le conducteur de chaque phase et la terre.



Câble de connexion sans écran protégé par des dispositifs MT contre les surtensions au niveau du coffret d'alimentation et des dispositifs de protection de type BT au niveau de la boîte de connexion entre chaque conducteur de phase et la terre.

Figure 2/K.57 – Schéma de protection: option 1

5.1.2.2 Câble de connexion avec écran métallique ou conducteur neutre

Dans le cas d'un câble de connexion avec écran métallique ou conducteur neutre, les dispositifs de protection contre les surtensions sont montés selon l'une des deux possibilités suivantes:

a) *Raccordement du dispositif de protection MT uniquement à l'écran*

Suivant ce système de protection, le type et les modes de raccordement des dispositifs de protection contre les surtensions sont les suivants (voir Figure 3, Option 2):

- 1) au niveau du coffret d'alimentation un seul dispositif de protection MT est raccordé entre l'écran et la terre du pylône;
- 2) au point de connexion, l'écran est directement mis à la terre et aucun dispositif basse tension de protection contre les surtensions n'est installé.

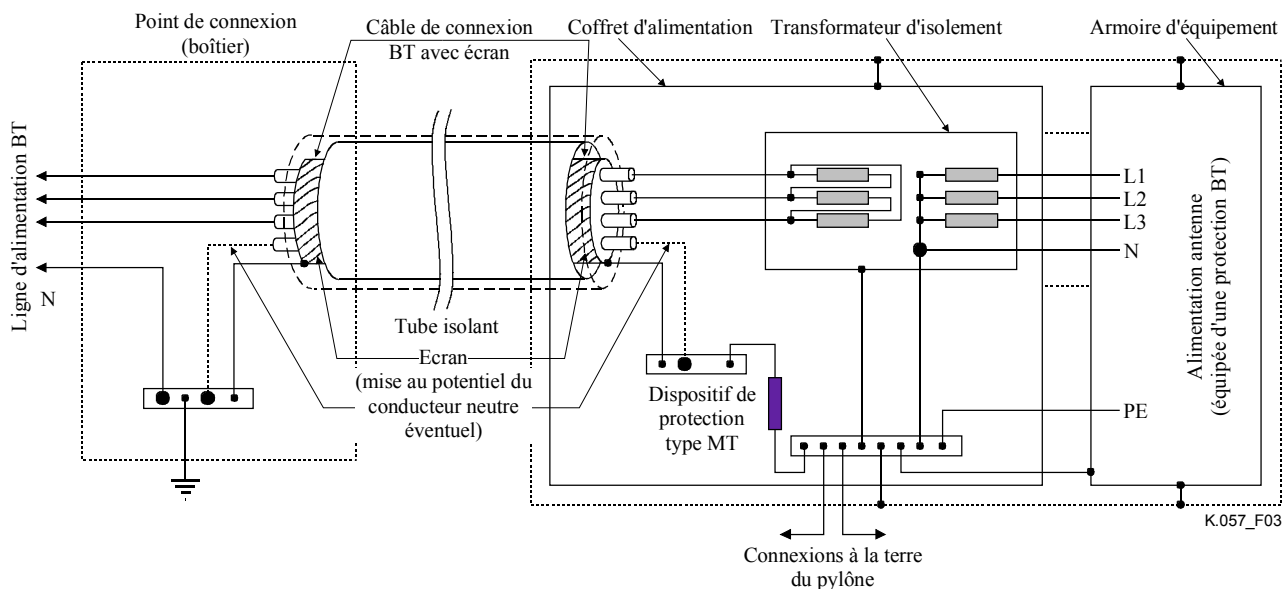
NOTE 1 – Lorsqu'on applique ce système de protection, on suppose que les tensions des conducteurs de phase sont pratiquement mises au potentiel de l'écran en raison du couplage inductif et capacitif étroit entre l'écran et les conducteurs de phase.

b) *Installation conjointe de dispositifs MT et BT de protection contre les surtensions*

Avec ce système de protection, les types et les modes de connexion des dispositifs de protection sont les suivants (voir Figure 4, Option 3):

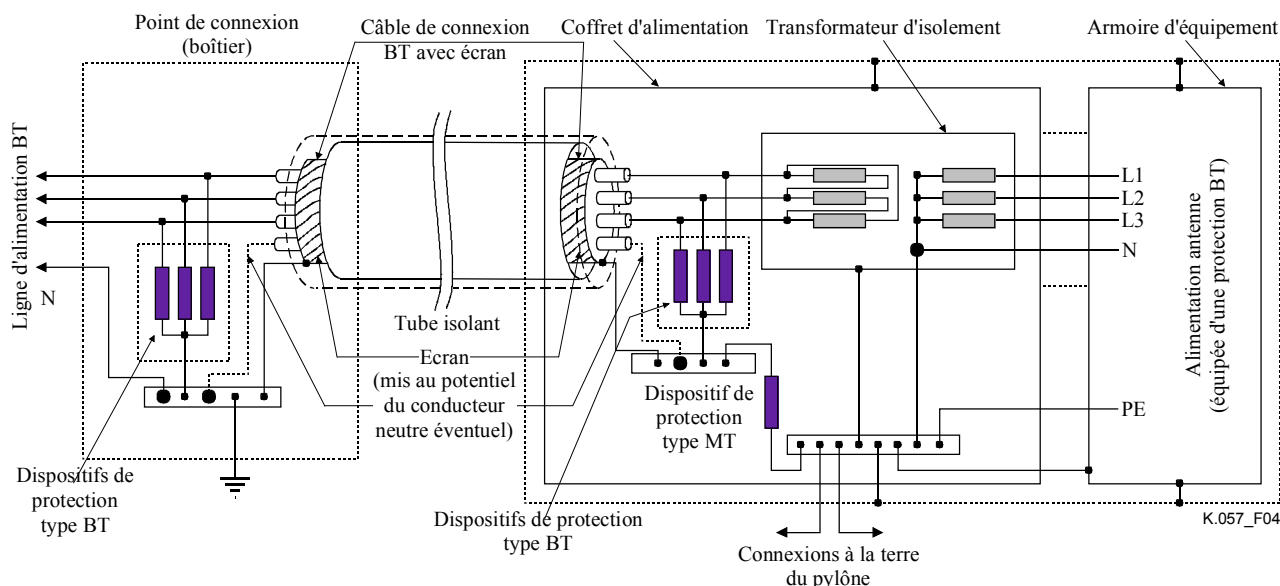
- 1) au niveau du coffret d'alimentation, un seul dispositif de protection contre les surtensions MT est monté entre l'écran et la terre du pylône, tandis que les dispositifs de protection BT sont montés entre chaque conducteur de phase et l'écran;
- 2) au niveau du point de connexion: l'écran est directement mis à la terre et le dispositif de protection contre les surtensions de type BT est monté entre chaque conducteur de phase et l'écran.

NOTE 2 – Avec ce système de protection, la connexion équipotentielle entre l'écran et les conducteurs de phase est assurée par les dispositifs de protection contre les surtensions de type BT.



Câble de protection avec écran protégé par un seul dispositif de protection contre les surtensions MT, installé entre l'écran et la mise à la terre du pylône au niveau du coffret d'alimentation, avec mise à la terre directe de l'écran au niveau du point de connexion.

Figure 3/K.57 – Schéma de protection: option 2



Câble de protection avec écran protégé par un seul dispositif de protection contre les surtensions MT, installé entre l'écran et la mise à la terre du pylône au niveau du coffret d'alimentation, avec mise à la terre directe de l'écran au niveau du point de connexion avec dispositifs de protection BT contre les surtensions installés entre chaque conducteur de phase et l'écran au niveau du coffret d'alimentation et de la boîte de connexion.

Figure 4/K.57 – Schéma de protection: option 3

5.1.3 Protection de la ligne d'alimentation (point de raccordement inclus)

La ligne d'alimentation reliant le point de connexion au point de raccordement, notamment le point de raccordement proprement dit, doit être protégée conformément aux spécifications applicables aux systèmes de distribution de courant électrique basse tension, tel qu'indiqué dans les documents CEI 61643-1 et CEI 61643-12. Le système de protection, en particulier les conditions de mise à la masse et de mise à la terre, doit être conforme aux spécifications applicables aux locaux d'abonnés tel qu'indiqué dans la Rec. UIT-T K.31.

5.1.4 Protection d'un transformateur MT/BT installé dans la zone EPR

Dans le cas d'une RBS alimentée par un transformateur MT/BT installé dans la zone EPR, le type suivant de protection doit être installé:

- connexion équipotentielle par un fil de cuivre d'au moins 35 mm² de section, entre la terre du pylône HT et la barre de terre du transformateur;
- dispositif SPD MT (par exemple, MOV ou similaire) installé entre chaque conducteur de phase, côté MT, et la barre de terre au niveau du transformateur.

NOTE 1 – Cette solution sert normalement à protéger le transformateur contre les surtensions dues à la foudre provenant de la ligne MT;

- installation d'un dispositif de protection contre les surtensions type BT entre chaque conducteur de phase et la terre du pylône dans le coffret d'alimentation de la RBS.

NOTE 2 – Ce dispositif de protection contre les surtensions de type BT permet de protéger l'équipement de la station de base de radiocommunication.

5.1.5 Protection en cas d'alimentation provenant d'un transformateur MT/BT situé à l'extérieur de la zone EPR et desservant uniquement la RBS

Dans le cas d'une station RBS alimentée à partir d'un transformateur MT/BT situé en dehors de la zone EPR, mais pas très éloigné (à moins de 50-60 m), les systèmes de protection applicables sont les suivants:

- le transformateur d'isolement MT/BT doit être installé dans le coffret d'alimentation;

- b) la ligne d'alimentation BT est considérée comme une section de connexion; il faut par conséquent la protéger conformément aux dispositions du point 5.1.2 suivant l'option, qui correspond à la configuration en présence.

NOTE 1 – Le système de protection indiqué au § 5.1.2.2 a) n'est pas recommandé en cas de niveau du transformateur MT/BT;

- c) un dispositif de protection contre les surtensions de type MT doit être installé entre chaque phase côté MT et la terre côté transformateur MT/BT.

NOTE 2 – Ce système sert normalement à protéger le transformateur contre les surtensions dues à la foudre provenant de la ligne MT. L'installation d'un dispositif de protection contre les surtensions de type MT n'est pas forcément nécessaire lorsque le transformateur est alimenté par un câble MT soigneusement blindé.

5.2 Alimentation à partir d'un réseau MT

Une autre solution peut consister à alimenter l'armoire d'équipement à partir d'un réseau de distribution, généralement à une tension de 10 à 20 kV. Dans ce cas, câbles et transformateur bénéficient automatiquement d'un niveau d'isolation supérieur. Le transformateur d'isolement est alors remplacé par un transformateur de distribution (voir Figure 5). Toutefois, l'écran du câble MT doit être isolé et protégé par un dispositif de protection contre les surtensions de type MT par rapport à la terre du pylône, conformément aux dispositions du § 5.1.2.2 et selon la Figure 3. L'isolation prescrite entre l'écran et la terre doit être assurée grâce à l'installation d'une gaine plastique isolante sur le câble MT ou en installant le câble dans un tube isolant étanche, le long de la section de jonction (Tableau III.2).

5.3 Alimentation à partir de la ligne HT

On ne connaît actuellement aucune méthode de ce type dont l'emploi serait justifié d'un point de vue technique et économique. Aussi cette méthode d'alimentation des stations RBS n'est-elle pas recommandée.

6 Exigences concernant le système d'antenne

L'installation de la station RBS doit répondre aux exigences suivantes:

- des câbles coaxiaux entre l'armoire d'équipement et l'antenne (les antennes) doivent être installés de manière appropriée dans des gaines réservées à cet effet ou fixés à la structure du pylône, pour faciliter l'entretien et la réparation des défauts du matériel proprement dit et des pylônes;
- les câbles souterrains reliant l'armoire d'équipement au pylône doivent être posés dans des conduits isolés;
- le matériel de communication, les antennes et les accessoires doivent être d'un type agréé, conforme aux réglementations nationales et aux spécifications;
- les antennes seront installées dans des champs électriques intenses, où elles seront sans doute exposées à des effets de couronne et à des arcs électriques. Le propriétaire des antennes doit en tenir compte pour éviter une détérioration de leur fonctionnement;
- en fonction du type de pylône et de l'emplacement des antennes, la compagnie d'électricité doit déterminer l'intensité maximale des champs électriques et magnétiques de la ligne de transport;
- en cas d'installation des antennes au-dessus des fils de terre aériens, elles doivent alors être protégées contre la foudre (voir Rec. UIT-T K. 56).

7 Câbles de télécommunication

Afin d'éviter les problèmes d'induction et de montée en potentiel au niveau des défauts de terre, les télécommunications doivent utiliser des câbles non métalliques en fibre optique, ou des liaisons radio, voir Figures 6 et 7.

En cas d'utilisation de câbles métalliques pour les télécommunications, leur construction et leur raccordement doivent s'effectuer dans les mêmes conditions que pour l'alimentation électrique BT. Autrement dit:

- ils doivent être dotés d'un niveau d'isolation adéquat;
- ils doivent être installés dans un tube plastique isolant étanche;
- leur extrémité doit être raccordée à un transformateur;
- ils doivent être équipés de dispositifs appropriés de protection contre les surtensions.

Le point de transition ne doit pas être trop proche du point où la montée en potentiel de terre peut atteindre 650 volts. Ce niveau de tension correspond à la limite d'une surtension momentanée d'une durée $\leq 0,5$ s. D'autres niveaux peuvent être adoptés conformément à la Rec. UIT-T K.33.

Voir également la Rec. UIT-T K.8.

8 Systèmes de mise à la terre

Les systèmes de mise à la terre sont importants pour la sécurité et la protection des équipements. Les règles suivantes doivent être appliquées:

- les parties métalliques de l'antenne doivent être mises à la masse de l'écran coaxial et mis à la terre de l'ossature métallique du pylône;
- l'autre extrémité de l'écran doit être connectée à la terre de l'armoire d'équipement;
- le dispositif PGE doit être installé à une profondeur d'environ 0,3 m, autour de l'armoire d'équipement afin de limiter les tensions de toucher et de pas; il peut s'agir d'un dispositif à cadre simple ou double, correspondant au niveau effectif de potentiel à limiter. Les électrodes de répartition doivent être mises à la terre de l'armoire, ainsi qu'aux pieds du pylône, au moins dans deux angles (voir Figure III.14). Le dispositif de mise à la masse doit être installé en diagonale, lorsque l'armoire est situé entre les pieds du pylône (voir ligne en gras sur la Figure III.15). Des indications sont fournies à l'Appendice III (voir III.2.2 b) et figures susmentionnées) quant à l'emplacement proposé des cadres de répartition du potentiel;
- le réseau de terre des armoires contenant respectivement l'équipement et le transformateur doivent être mis au potentiel de terre du pylône par un fil de cuivre d'au moins 35 mm² de section. Cela peut exiger une protection cathodique, en cas d'utilisation de métaux différents dans le réseau de terre.

9 Installation et entretien

L'installation et l'entretien du matériel installé sur le pylône, par exemple, des antennes et des câbles, sont réservés au personnel spécialement formé à cet effet et dûment informé des champs électriques et magnétiques créés par les lignes de transport (normalement les poseurs de ligne de la compagnie d'électricité). Toutefois, des précautions particulières doivent être observées vis-à-vis du risque d'exposition aux champs électromagnétiques créés par l'antenne de la station RBS. Des indications à cet égard figurent dans la Rec. UIT-T K.52.

Les installations au sol sont normalement réalisées par le personnel des stations RBS spécialement formé à cet effet.

Les réglementations nationales en vigueur imposent parfois des restrictions supplémentaires quant à l'exécution de ce type de tâche.

10 Exemples d'installation

Les Figures 5 à 7 donnent des exemples d'installations.

La Figure 8 représente une installation empêchant tout accès non autorisé.

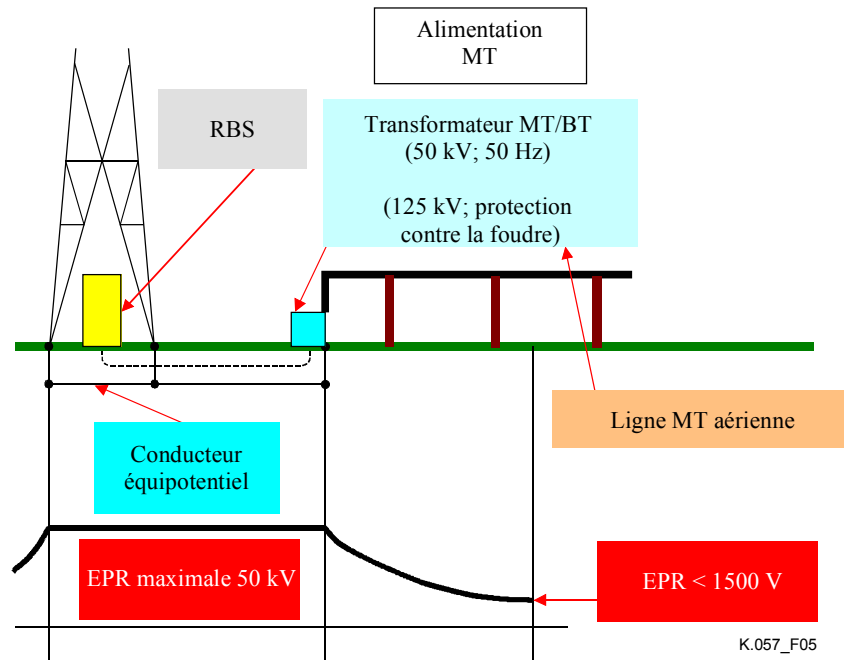


Figure 5/K.57 – Alimentation MT d'une station RBS

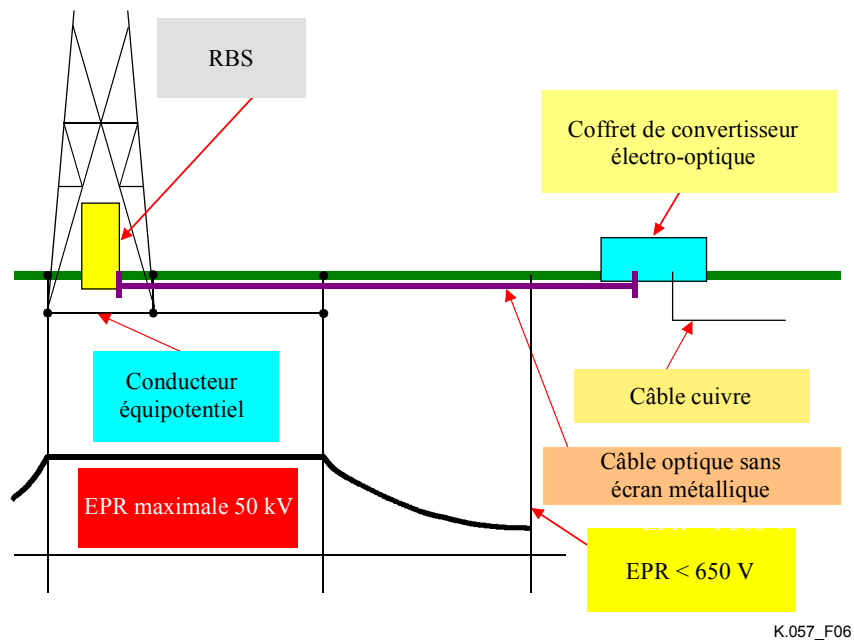


Figure 6/K.57 – Raccordement au réseau de télécommunication par fibre optique

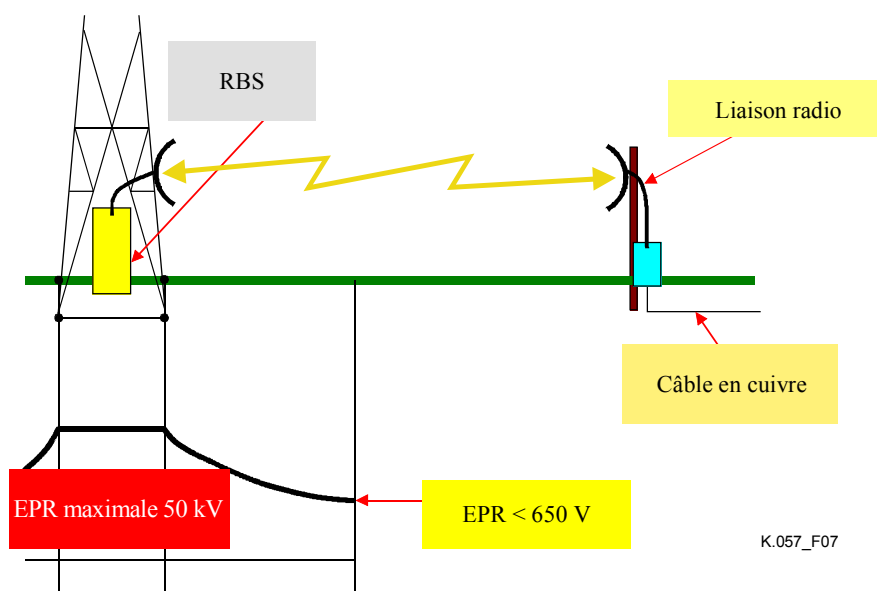


Figure 7/K.57 – Raccordement au réseau de télécommunication par liaison radio

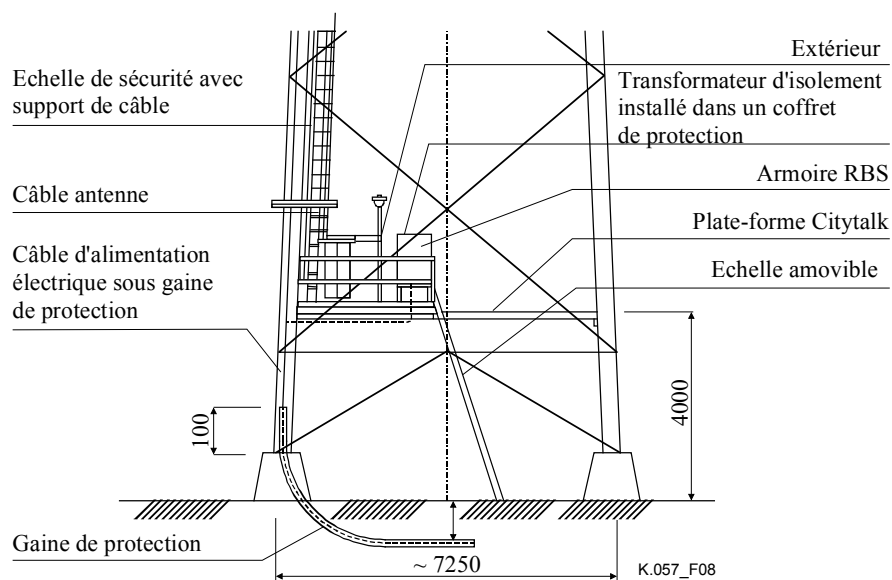


Figure 8/K.57 – Installation surélevée d'une station RBS sur un pylône de transport

Appendice I

Guide sur la coordination du niveau d'isolement nécessaire aux circuits d'alimentation électrique et de l'élévation du potentiel des pylônes électriques

I.1 Champ de l'étude

Les travaux concernant l'élévation du potentiel de terre des pylônes présentés dans le présent appendice appliquent la technique dite de la solution multiconducteurs [I.1] à la réalisation d'une étude de sensibilité, dont les indications permettent de définir le potentiel correspondant à des conditions pratiques données.

L'étude réalisée correspond aux conditions optionnelles suivantes:

- 1) longueur L de la ligne (km): 15 ou 60;
- 2) emplacement du défaut: à proximité de l'origine (km 1), au milieu (km L/2) ou près de l'extrémité (km L – 1) de la ligne, et aussi à un emplacement variable par échelons;
- 3) résistance de terre des sous-stations à l'origine/extrémité des lignes (Ω): 0,1/0,1 ou 0,1/1;
- 4) mode d'alimentation: monofilaire (1×10 kA) ou bifilaire (2×5 kA);
- 5) options de fil écran (sw, *shield wire*) et de fil contrepoids (cp, *counterpoise*): deux fils sw ou seulement un fil sw ou un fil cp;
- 6) résistance de terre du pylône (Ω)/résistivité du sol (Ω m): 8/50, 25/500 ou 50/2500;
- 7) espacement moyen des pylônes.

Les résultats sont exprimés pour une valeur de référence de 10 kA de l'intensité du courant de défaut phase-terre. Si l'on considère le caractère pratiquement linéaire du phénomène étudié, les élévations T-EPR obtenues peuvent être calculées, pour une valeur quelconque du courant de défaut de terre, proportionnellement à ce même courant de défaut rapporté au courant de référence de 10 kA.

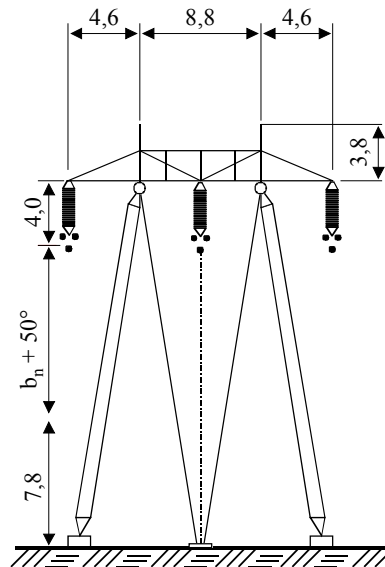
I.2 Options étudiées – Paramètres

I.2.1 Structure de la ligne – Options

La Figure I.1 représente les dispositions de conducteurs présentes sur les lignes étudiées de transport d'énergie électrique à 400 kV. Dans les deux dispositions étudiées les trois options suivantes sont prises en compte:

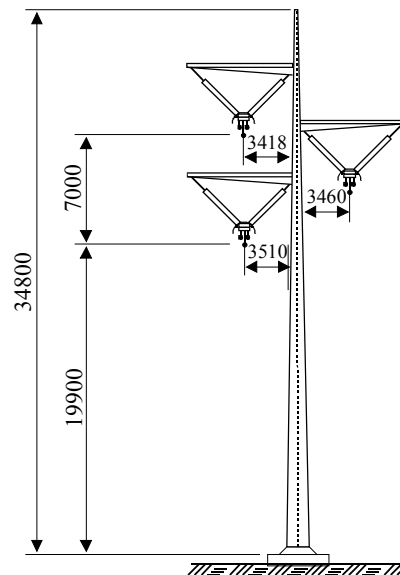
- A) conducteur de phase horizontal, avec **deux fils écrans (sw)** (Figure I.1 a);
- B) disposition compacte triangulaire des conducteurs de phase, avec **un fil écran (sw)** (Figure I.1 b);
- C) comme B, mais avec **un fil écran et un fil contrepoids (cp)**.

Le fil contrepoids est constitué d'un fil de cuivre nu de 35 mm² de section, installé le long de la ligne à une profondeur d'environ 0,5 m. Les pylônes ne sont pas raccordés au fil contrepoids par un conducteur métallique. Toutefois, les éclateurs installés entre la terre du pylône et le fil contrepoids ont une tension d'amorçage et raccordent le pylône au fil contrepoids lorsque l'élévation T-EPR dépasse environ 3 kV. A l'exception de cette situation, aucune connexion n'est supposée entre la terre du pylône et le fil contrepoids, sauf en présence d'un défaut.



Structure du système de conducteur de phase: $3 \times (3 \times 593) \text{ mm}^2$
 Structure du système conducteur écran (de terre): $2 \times 142 \text{ mm}^2$
 $b_n + 50^\circ = 12,72 \text{ m}$

a) Disposition d'une ligne d'énergie électrique comportant deux fils écrans (cas A)



K.057_Fl.1

Structure du système de conducteur de phase: $3 \times (3 \times 593) \text{ mm}^2$
 Structure du système conducteur écran (de terre): $1 \times 241 \text{ mm}^2$
 Un fil contrepois supplémentaire peut être installé à une profondeur de 50 cm.

b) Disposition de la ligne de transport d'énergie à un seul fil écran (cas B) équipée le cas échéant d'un fil contrepois (cas C)

Figure I.1/K.57 – Structures de ligne considérées dans les études de sensibilité (espacement normal: 333 m)

L'espacement moyen considéré entre les pylônes est de 333 m (un tiers de km). Des études ont également été réalisées pour des espacements moyens de 200 m et de 500 m afin de vérifier l'incidence de l'espacement.

Des calculs de simulation ont été réalisés pour les longueurs de ligne suivantes:

- code L15: "ligne courte" de 15 km;
- code L60: "ligne longue" de 60 km.

1.2.2 Choix des paramètres

1.2.2.1 Mise à la terre de la sous-station

Les deux options suivantes ont fait l'objet de simulations pour différentes résistances de terre des sous-stations aux extrémités de la ligne:

- code S1: faible résistance aux deux extrémités, c'est-à-dire $0,1 \Omega/0,1 \Omega$;
- code S2: faible résistance à l'origine (extrémité S au km 0) et impédance plus élevée à l'autre extrémité (R au km L) c'est-à-dire $0,1 \Omega/1 \Omega$.

1.2.2.2 Résistance de terre du pylône et résistivité spécifique du sol

La résistivité spécifique du sol influe sur deux types de paramètres pris en compte dans les simulations. La résistivité spécifique du sol de surface influe principalement sur la résistance de terre du pylône. La résistance de terre – en supposant une structure donnée d'électrode – est en principe proportionnelle à la résistivité spécifique du sol dans lequel le réseau d'électrodes est installé.

La résistivité spécifique de la couche de sol plus profonde a une certaine incidence sur les auto-impédances et les impédances mutuelles séries, l'une et l'autre avec retour par la terre, de la ligne. L'effet est assez limité sur l'auto-impédance, comme sur l'impédance mutuelle lorsque les conducteurs sont faiblement espacés, par exemple entre les conducteurs de phase et les fils écrans.

Par conséquent, il convient de retenir l'hypothèse non d'une corrélation étroite, mais d'une certaine corrélation entre résistance de terre du pylône et résistivité spécifique du sol. Les options suivantes sont donc prises en considération dans l'étude de simulation:

Code	Résistance de terre du pylône [Ω]	Résistivité spécifique du sol [Ωm]
R1	8	50
R2	25	500
R3	50	2500

1.2.2.3 Localisation des défauts

Les calculs ont été réalisés pour chaque option simulée, avec un défaut situé au milieu de la ligne (km L/2).

Dans le cas d'une injection de courant monofilaire ($1 \times 10 \text{ kA}$), les emplacements de défaut suivants ont également été étudiés:

- à une distance de 1 km de chaque extrémité de la ligne;
- à des distances variables par échelons de 1 km sur la ligne de 15 km et par échelons de 2 km sur la ligne de 60 km.

1.2.2.4 Intensité et mode d'introduction du courant de défaut

L'élévation du potentiel est liée à la composante de courant homopolaire I_0 . Dans le cas d'un défaut phase-terre, la composante de courant homopolaire $3I_0$ est égale au courant de défaut observé au niveau de l'emplacement défectueux. En ce point, on suppose dans les études de sensibilité une intensité de courant de défaut $3I_0 = 10 \text{ kA}$. Puisque l'on suppose dans chaque phase une intensité I_0 tout le long de la ligne, les effets des composantes positives et négatives de courant homopolaire

sont négligés. A toutes fins pratiques, cela signifie la prise en compte des effets moyens entre les conducteurs de phase et les fils écrans ou encore cela revient à négliger les petites différences résultant de l'apparition du courant de défaut dans les différentes phases.

La répartition du courant entre les portions de la ligne située de part et d'autre de l'emplacement du défaut, les deux situations extrêmes suivantes sont simulées:

- circulation d'un seul courant de 1×10 kA dans un seul sens, c'est-à-dire entre le km 0 et l'emplacement du défaut;
- circulation de 2×5 kA respectivement sur chaque moitié, c'est-à-dire $3I_0 = 5$ kA entre le km 0 et l'emplacement du défaut, d'une part, et entre cet emplacement et le km L d'autre part.

Dans la réalité, la répartition du courant dépend de la position relative du défaut, mais surtout des impédances homopolaires des sous-stations, lesquelles sont déterminées dans une large mesure par les transformateurs à conducteur neutre installés dans les sous-stations aux extrémités de la ligne. Toutefois, le courant unifilaire circule au moins de façon temporaire, pendant le processus de déclenchement, en raison de la coupure non simultanée observée aux deux extrémités de la ligne défectueuse.

I.3 Analyse des résultats

I.3.1 Analyse qualitative

Pour déterminer l'importance relative des différentes situations recensées au § I.1, les résultats observés en matière de montée en potentiel de terre du pylône ont fait l'objet d'une analyse qualitative. Le résultat le plus important est le potentiel du fil écran (des fils écrans), puisqu'en raison de la connexion métallique entre le pylône et les fils écrans, l'élévation du potentiel d'un pylône donné est identique à la valeur du potentiel du fil écran au niveau du pylône considéré.

Cette analyse qualitative s'appuie principalement sur des diagrammes qui présentent les résultats les plus significatifs des simulations.

La plus forte élévation du potentiel intervient évidemment au niveau du pylône défectueux (voir Figure I.2, Figure I.3 et Figure I.4). Le potentiel du fil écran diminue en fonction inverse de l'éloignement du défaut. Le potentiel du fil écran tend à tomber à zéro du côté de la ligne où aucun courant homopolaire n'est introduit à l'emplacement du défaut (voir diagramme de droite des Figures I.2 et I.3); il tend par contre d'abord à tomber à zéro, puis à augmenter au-delà de cette section de la ligne et à l'approche de la sous-station, ce qui introduit un courant homopolaire à l'emplacement du défaut (voir diagramme de gauche des Figures I.2, Figure I.3 et aussi sur les deux diagrammes de la Figure I.4).

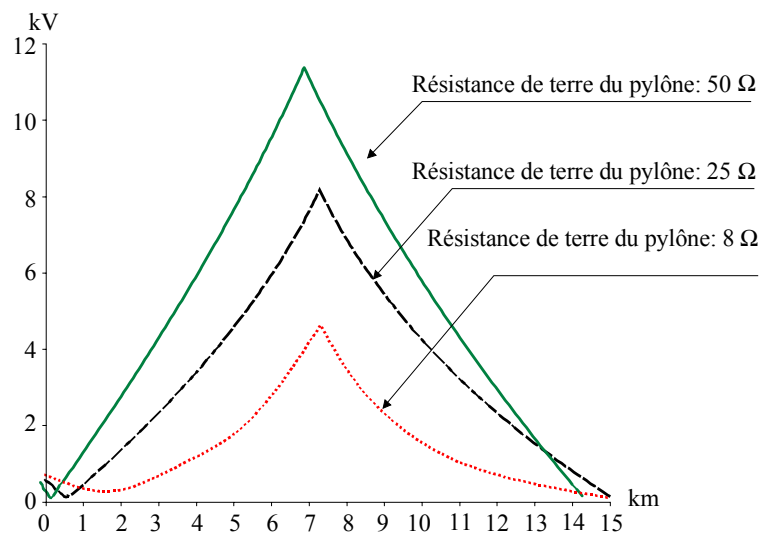
Quant à l'incidence de l'emplacement du défaut, on peut affirmer que l'élévation du potentiel du pylône défectueux ne varie pratiquement pas, sinon à proximité des extrémités (dans les zones d'effet terminal) où le potentiel diminue de façon à atteindre l'élévation du potentiel de terre de la sous-station (voir Figure I.5). Il y a lieu de signaler que cette tendance à la diminution est observée uniquement dans l'hypothèse où l'intensité du courant de défaut de terre est constante; or, en fait, cette intensité augmente lorsque le défaut est plus proche de la sous-station. Dans la réalité on peut cependant observer que ces contre-effets peuvent se compenser mutuellement dans une large mesure.

L'effet de l'espacement moyen sur l'élévation du potentiel du pylône en fonction de l'emplacement du défaut est établi dans le cas des lignes comportant un seul fil écran, tel qu'indiqué sur la Figure I.6. On peut constater que l'élévation du potentiel du pylône augmente en fonction de l'espacement moyen.

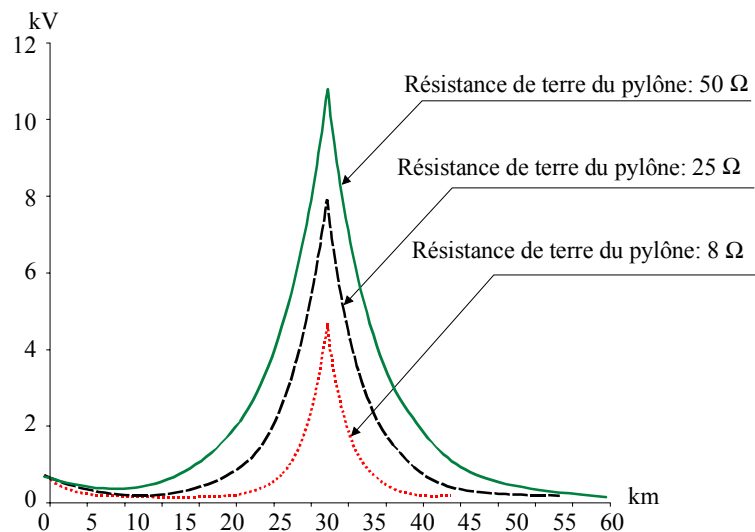
A des fins d'exhaustivité, la courbe du courant du fil écran est représentée à la Figure I.7. Les tendances suivantes peuvent être observées, lorsqu'un courant homopolaire ($3I_0 = 10 \text{ kA}$) circule seulement d'un côté (gauche):

- le courant du fil écran circule dans les deux sens, mais son intensité est nettement plus élevée du côté où le courant de défaut est introduit;
- l'intensité du fil écran tend à tomber à zéro du côté de la ligne où aucune composante homopolaire n'est introduite à l'emplacement du défaut.

Le courant dans le fil écran diminue dans un premier temps jusqu'à sa valeur constante induite, et ensuite, augmente généralement dans la zone d'effet terminale proche de la sous-station, ce qui introduit le courant homopolaire à l'emplacement du défaut.



a) Longueur de la ligne: $L = 15$ km

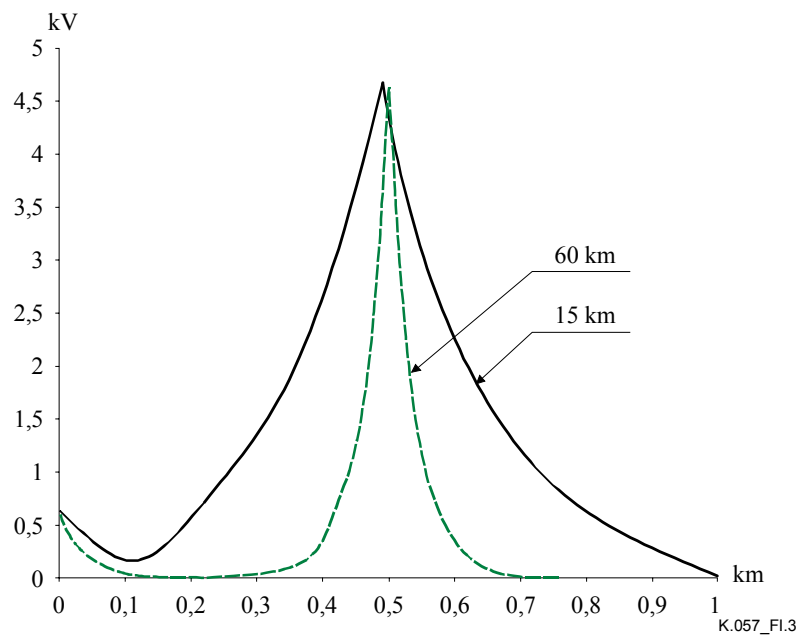


b) Longueur de la ligne: $L = 60$ km

K.057_FI.2

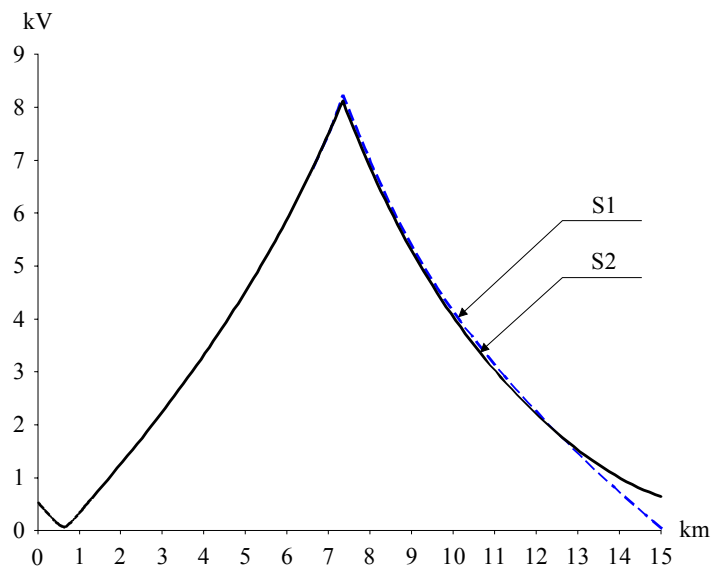
B Ligne de 400 kV, avec un fil écran et sans contrepoids
 S1 Résistance de terre de la sous-station: $0,1 \Omega / 0,1 \Omega$
 F2 Emplacement du défaut: $L/2$ km (F2)
 Courant de 1×10 kA circulant uniquement depuis la gauche
 de l'emplacement du défaut

Figure I.2/K.57 – Courbe du potentiel de fil écran en fonction de la longueur, pour différentes valeurs
Paramètre: résistance de terre du pylône

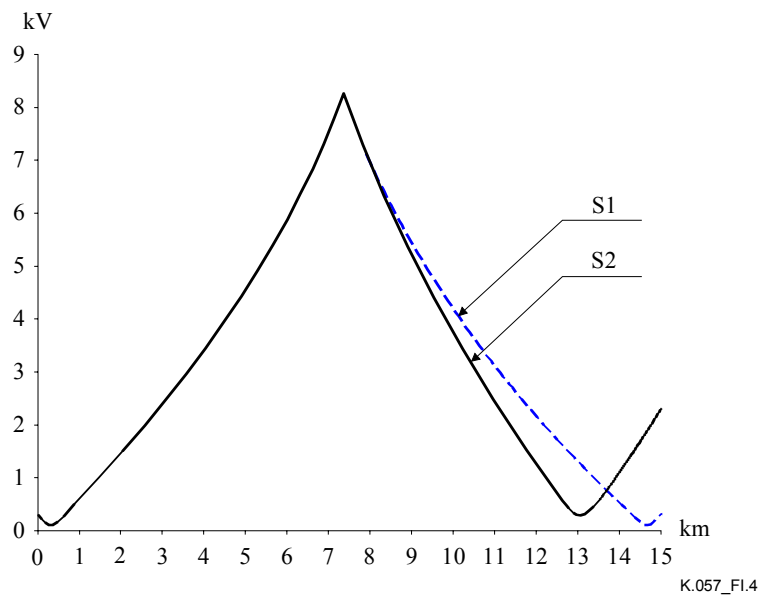


B Ligne de 400 kV, avec un fil écran et sans contrepoids
 S1 Résistance de terre de la sous-station: 0,1 Ω /0,1 Ω
 F2 Emplacement du défaut: L/2 km (F2)
 R1 Résistance de terre du pylône: 8 Ω
 Courant de 1×10 kA circulant uniquement depuis la gauche
 de l'emplacement du défaut

Figure I.3/K.57 – Variation du potentiel du fil écran en fonction de la longueur, pour différentes valeurs
Paramètre de échelle normalisée: longueur de la ligne



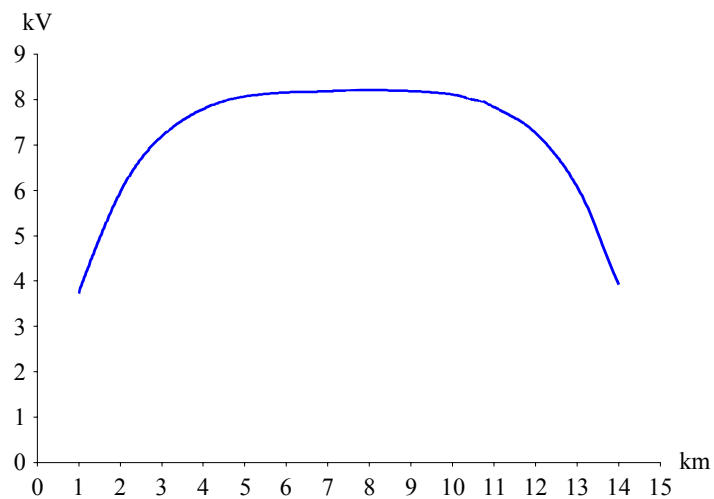
a) Intensité de courant 1×10 kA uniquement du côté gauche du défaut



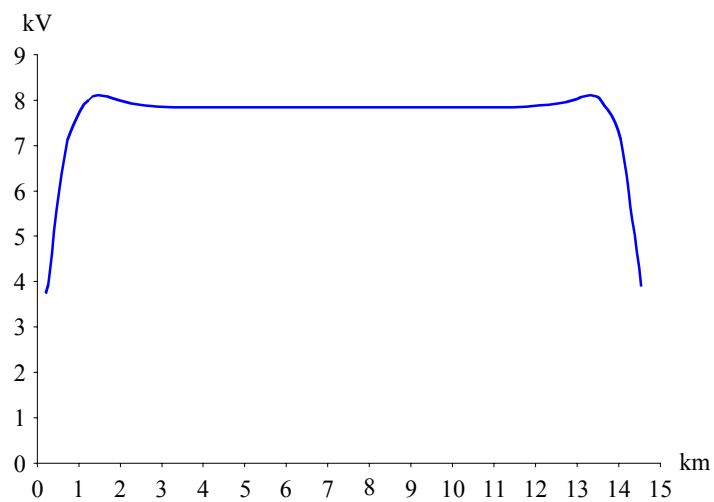
b) Intensité de courant 2×5 kA des deux côtés du défaut

B Ligne de 400 kV, avec un fil écran et sans contrepoids
 F2 Emplacement du défaut: L/2 km (F2)
 R2 Résistance de terre du pylône: 25 Ω

Figure I.4/K.57 – Variation du potentiel du fil écran en fonction de la longueur pour différentes valeurs
Paramètre: résistance de terre des sous-stations
S1 = 0,1 Ω /0,1 Ω , S2 = 0,1 Ω /1 Ω



a) Longueur de la ligne: $L = 15$ km

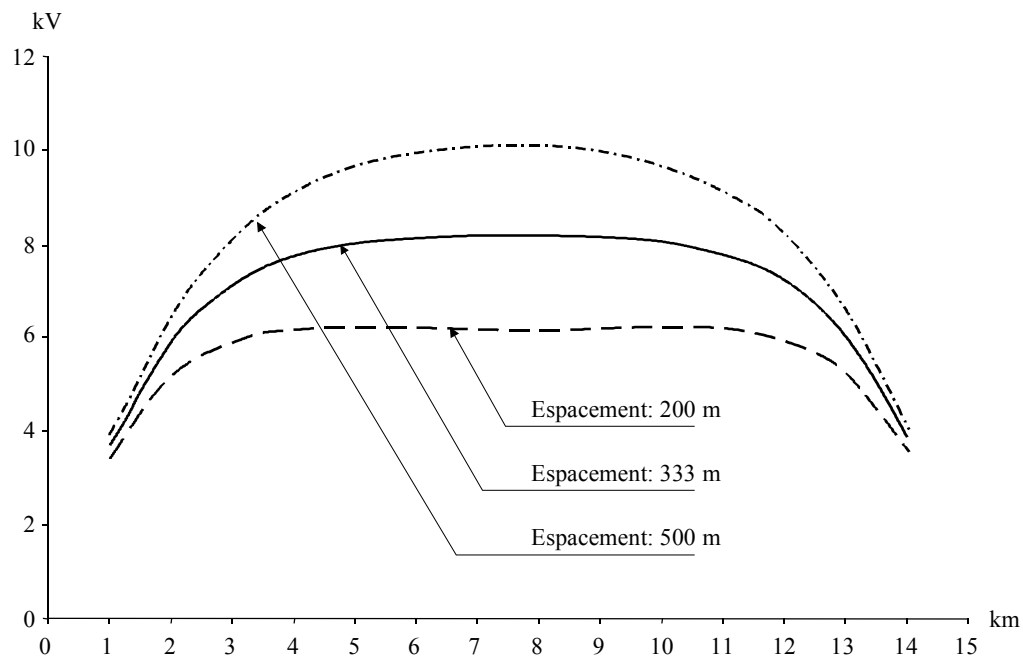


b) Longueur de la ligne: $L = 60$ km

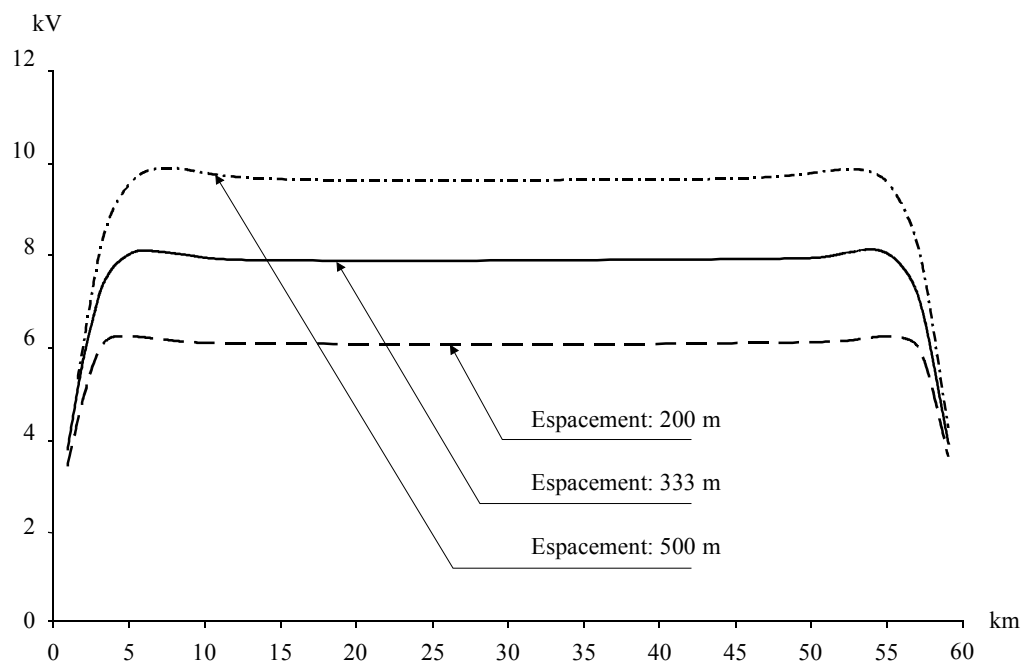
K.057_F1.5

B Ligne de 400 kV, avec 1 fil écran et sans contrepoids
 S1 Résistance de Terre de la sous-station: $0,1 \Omega / 0,1 \Omega$
 R2 Résistance de terre du pylône: 25Ω
 Courant de 1×10 kA circulant uniquement depuis la gauche
 de l'emplacement du défaut

Figure I.5/K.57 – Variation de la montée en potentiel de pylône du pylône défectueux en fonction de l'emplacement du défaut



a) Longueur de la ligne: L = 15 km

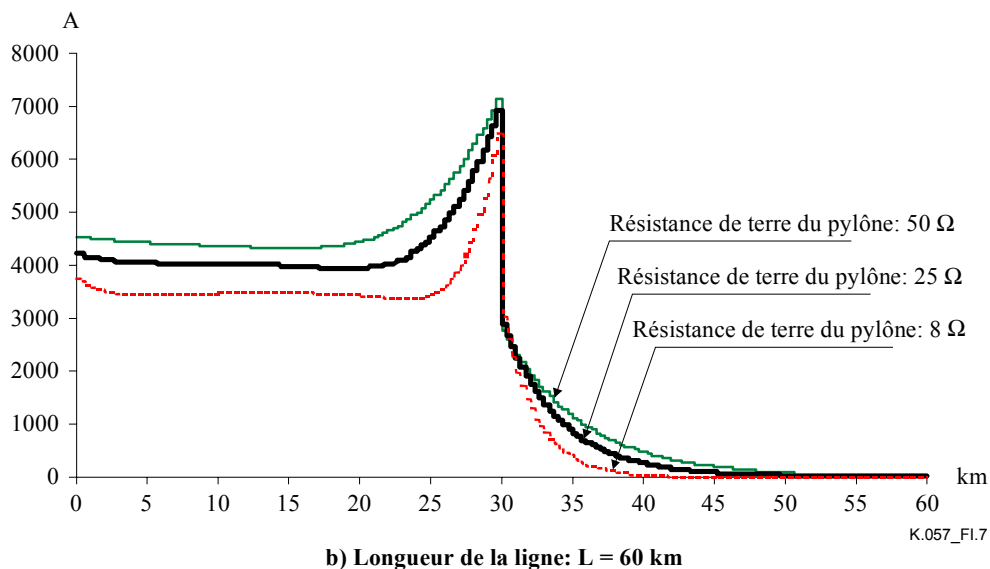
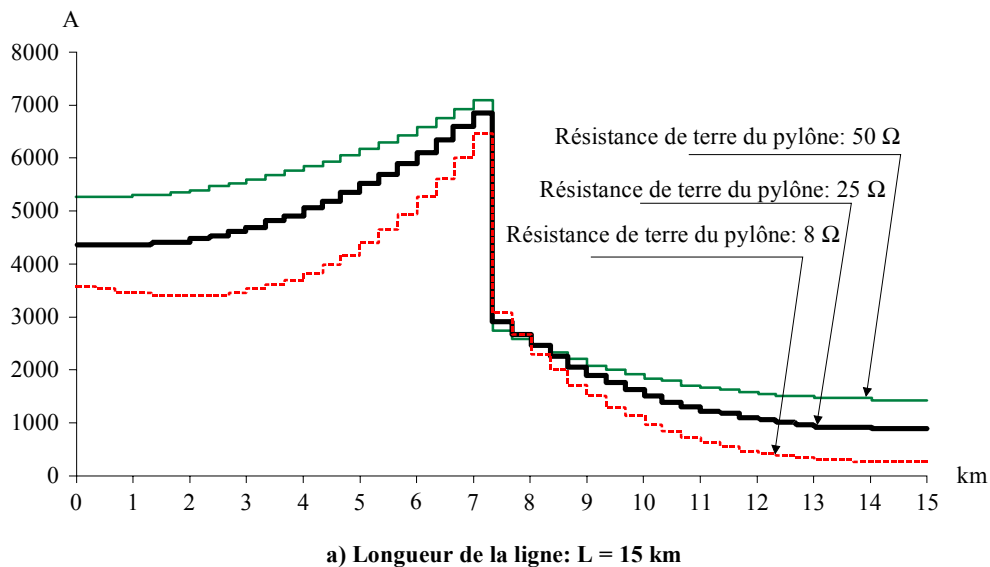


b) Longueur de la ligne: L = 60 km

K.057_FI.6

B Ligne de 400 kV, avec un fil écran et sans contrepoids
 S1 Résistance de terre de la sous-station: 0,1 Ω /0,1 Ω
 R2 Résistance de terre du pylône: 25 Ω
 Courant de 1 $\times$ 10 kA circulant uniquement depuis la gauche
 de l'emplacement du défaut

Figure I.6/K.57 – Incidence de l'espacement moyen (par m des tracés) sur l'élévation du potentiel du pylône en fonction de l'emplacement du défaut



B Ligne de 400 kV, avec un fil écran et sans contrepoids
 S1 Résistance de terre de la sous-station: 0,1 Ω /0,1 Ω
 F2 Emplacement du défaut: L/2 km (F2)
 Courant de 1×10 kA circulant uniquement depuis la gauche de l'emplacement du défaut

Figure I.7/K.57 – Variation du courant du fil écran en fonction de la longueur

I.3.2 Analyse quantitative

Selon leur importance relative du point de vue de l'élévation du potentiel du pylône on peut distinguer les trois catégories suivantes de caractéristiques et de paramètres à étudier:

- a) caractéristiques et paramètres dont l'importance est négligeable:
- longueur de la ligne (voir Figures I.3 et I.8 qui font apparaître seulement une très faible augmentation de l'élévation T-EPR sur une ligne plus courte);
 - résistance de terre des sous-stations (voir Figures I.4 et I.9);
 - intensité de courant de défaut unifilaire (1×10 kA) ou bifilaire (2×5 kA) (voir Figure I.10);

b) caractéristiques et paramètres déterminants:

- résistance de terre des pylônes (moyenne) (voir Figures I.2 et I.8);
- nombre de fils écrans (un ou deux) et emploi de contrepoids (voir Figure I.8).

Il y a lieu de signaler que l'intensité de courant de défaut fait également partie des paramètres déterminants. Toutefois, il s'agit d'un paramètre nominal, qui doit correspondre en principe à la valeur réelle observée (domaine de valeur) lors de l'estimation de la montée en potentiel de terre T-EPR associée à une situation donnée;

c) l'espacement des pylônes introduit une correction. L'importance relative de ce paramètre apparaît sur les Figures I.11 et I.12 pour des longueurs de ligne de 15 et 60 km respectivement. Le Tableau I.2 donne les facteurs de correction permettant de calculer les potentiels de pylônes différemment espacés.

Signalons cependant que les corrections à introduire en matière d'élévation du potentiel de terre des pylônes en fonction de l'espacement de ces derniers sont inférieures à $\pm 5\%$, pour des lignes équipées de fils écrans et de contrepoids et inférieures à $\pm 25\%$ pour les lignes équipées seulement de fils écrans.

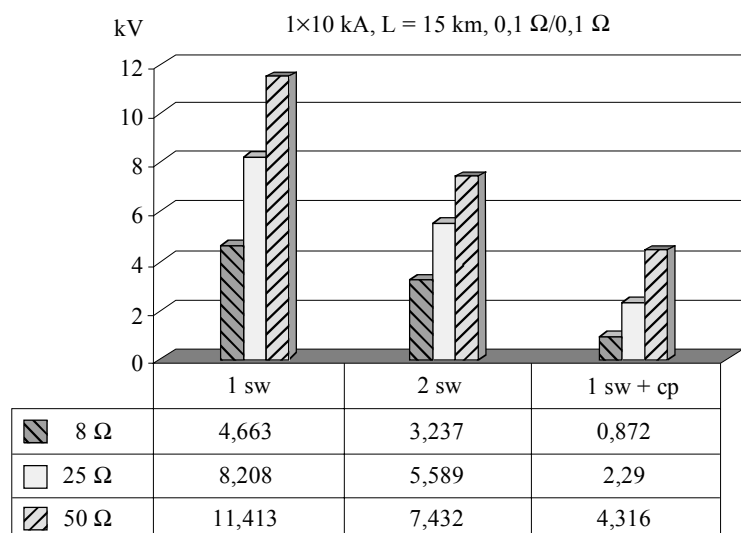
Le Tableau I.1 donne les valeurs de la montée en potentiel de terre des pylônes obtenues par les simulations effectuées pour les caractéristiques déterminantes. Ces résultats concernent un courant de défaut de terre de 10 kA et un espacement de 333 m utilisés comme valeurs de référence. Il est possible de les recalculer pour des valeurs différentes de 10 kA, en proportion de l'intensité du courant; de manière analogue, on peut recalculer la montée en potentiel de terre des pylônes, pour des espacements différents de la valeur moyenne de 333 m, en multipliant les valeurs initiales par les coefficients correcteurs indiqués au Tableau I.2.

Tableau I.1/K.57 – Elévation du potentiel des pylônes présentant un défaut de terre, pour les caractéristiques et les paramètres déterminants (courant de défaut de terre de 10 kA)

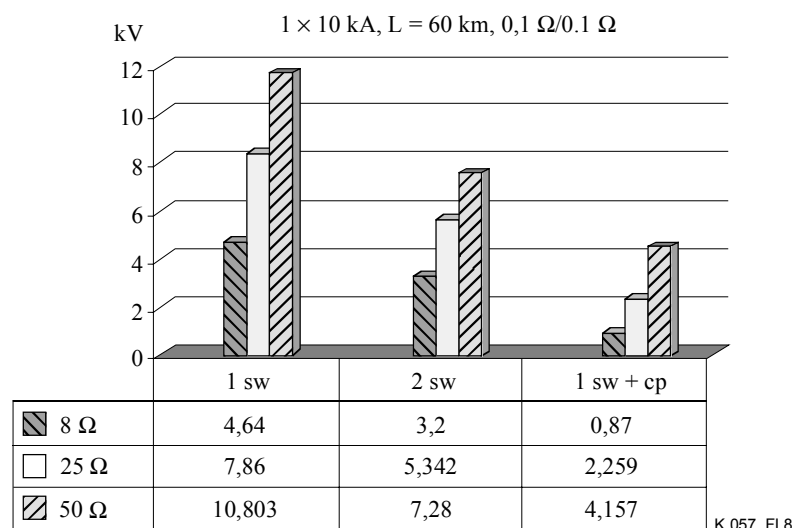
Résistance de terre [Ω]	Configuration de fil écran					
	1 sw		2 sw		1 sw + cp	
	[kV]	[Deg.]	[kV]	[Deg.]	[kV]	[Deg.]
8	4,663	31,40	3,237	22,62	0,872	19,68
25	8,208	32,45	5,589	25,13	2,290	20,08
50	11,413	37,70	7,432	31,32	4,316	22,63
sw	fil écran					
cp	contrepoids					

Tableau I.2/K.57 – Facteurs de correction pour le calcul de l'élévation du potentiel de terre des pylônes pour différents espacements (valeur de référence: tension de pylône pour un espacement de 333 m)

Structure du fil de terre	Espacement [m]	Longueurs de ligne [km]					
		15			60		
		Résistance de terre du pylône [Ω]			Résistance de terre du pylône [Ω]		
		8	25	50	8	25	50
1 sw	200	0,77	0,76	0,77	0,78	0,77	0,77
	333	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	500	1,23	1,24	1,18	1,22	1,22	1,22
2 sw	200	0,77	0,76	0,80	0,77	0,77	0,77
	333	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	500	1,24	1,21	1,14	1,22	1,22	1,22
1 sw + 1 cp	200	0,95	0,92	0,89	0,95	0,92	0,89
	333	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	500	1,03	1,06	1,08	1,03	1,05	1,08
NOTE – 1) configuration de ligne à 400 kV. 2) emplacement du défaut: L/2 km. 3) intensité de courant 2×5 kA, uniquement du côté gauche du défaut. 4) terre de la sous-station: 0,1 Ω /0,1 Ω .							



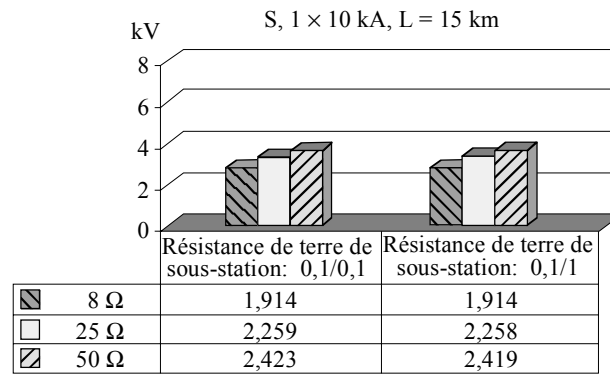
a) Longueur de la ligne: L = 15 km



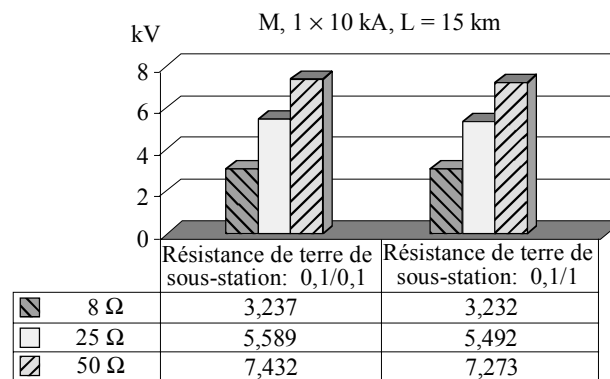
b) Longueur de la ligne: L = 60 km

S1 Résistance de terre de la sous-station: 0,1 Ω/0,1 Ω
 F2 Emplacement du défaut: L/2 km (F2)
 Courant de 1 × 10 kA circulant uniquement depuis la gauche
 de l'emplacement du défaut

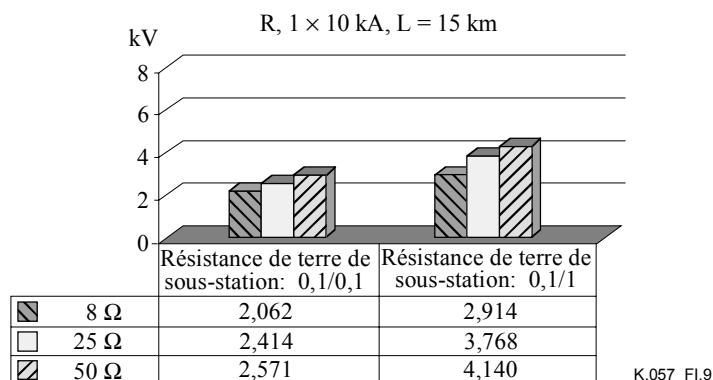
Figure I.8/K.57 – Elévation du potentiel du pylône défectueux pour différentes valeurs de la résistance de terre du pylône et différentes options fil écran/contrepois



a) Défaut situé au km 1



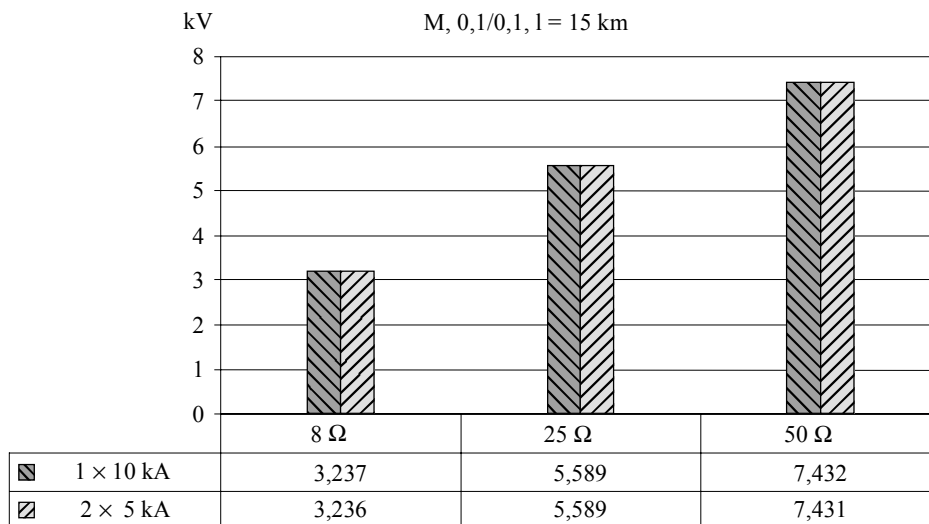
b) Défaut situé au milieu de la ligne



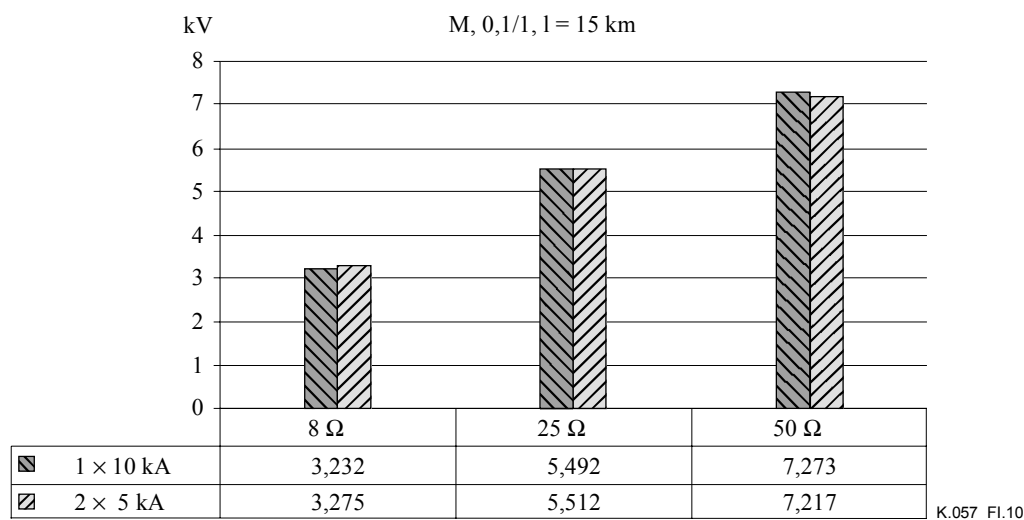
c) Défaut situé au km 14

A Ligne de 400 kV avec 2 fils écrans et sans contrepoids
 R2 Résistance de terre du pylône: 25 Ω
 L15 Longueur de ligne: L = 15 km
 Courant de 1×10 kA circulant uniquement depuis la gauche
 de l'emplacement du défaut

Figure I.9/K.57 – Elévation du potentiel du pylône défectueux pour différentes résistances de terre du pylône et pour plusieurs options de résistance de terre des sous-stations



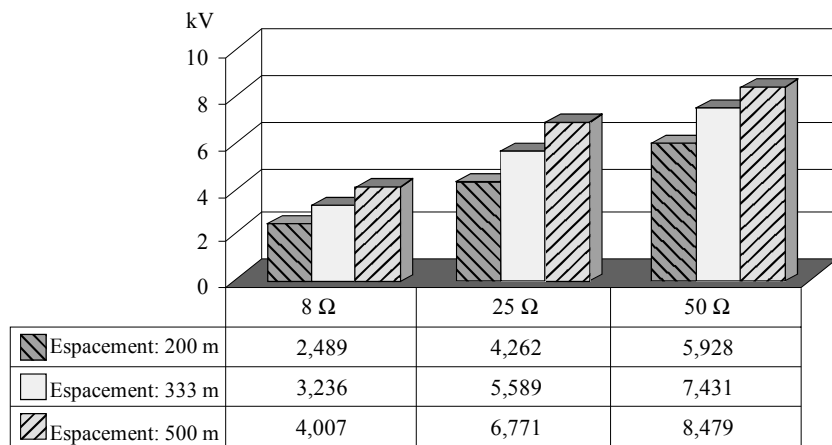
a) Résistance de terre de la sous-station S1 = 0,1 Ω/0,1 Ω



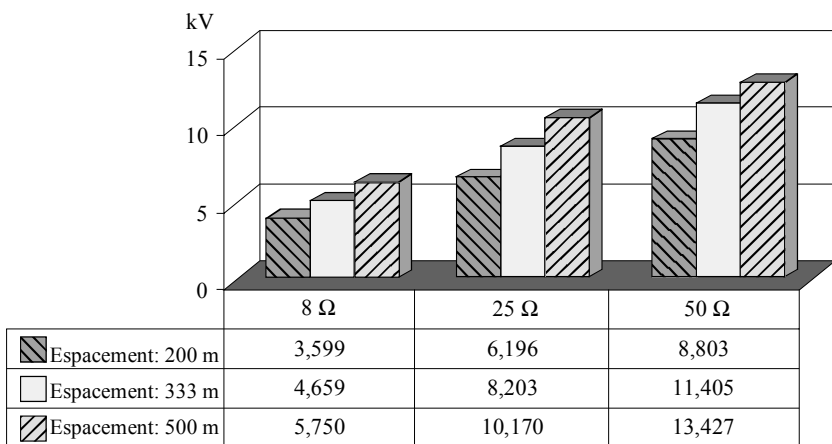
b) Résistance de la sous-station S2 = 0,1 Ω/1 Ω

A Ligne de 400 kV avec 2 fils écrans et sans contrepoids
 F2 Emplacement de défaut: L/2 km (F2)

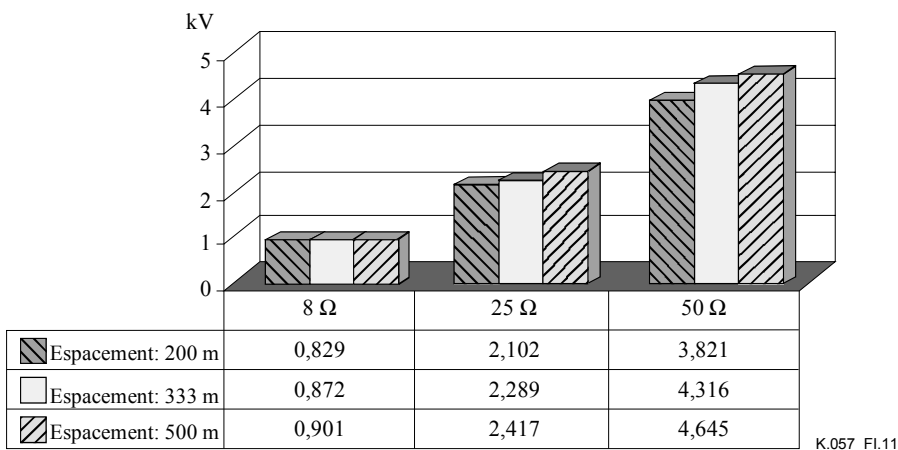
Figure I.10/K.57 – Elévation du potentiel du pylône défectueux, pour un courant de défaut unifilaire (1 × 10 kA) ou bifilaire (2 × 5 kA) et pour différentes résistances de terre du pylône



a) 1 fil écran



b) 2 fils écran

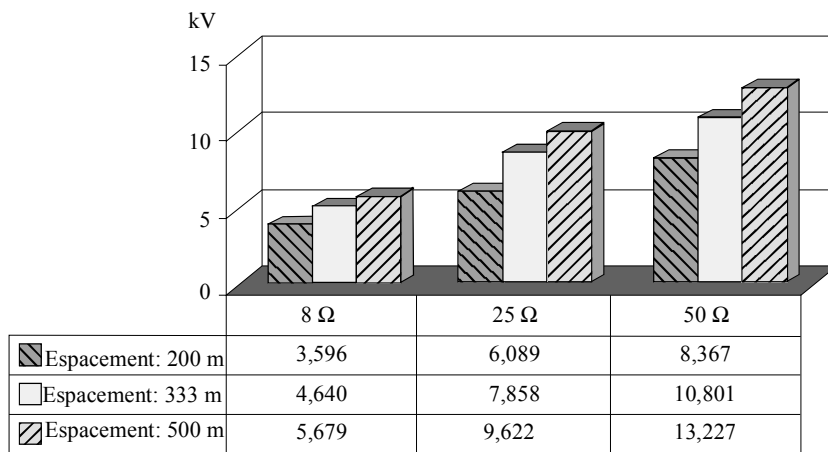


c) 1 fil écran et 1 contrepois

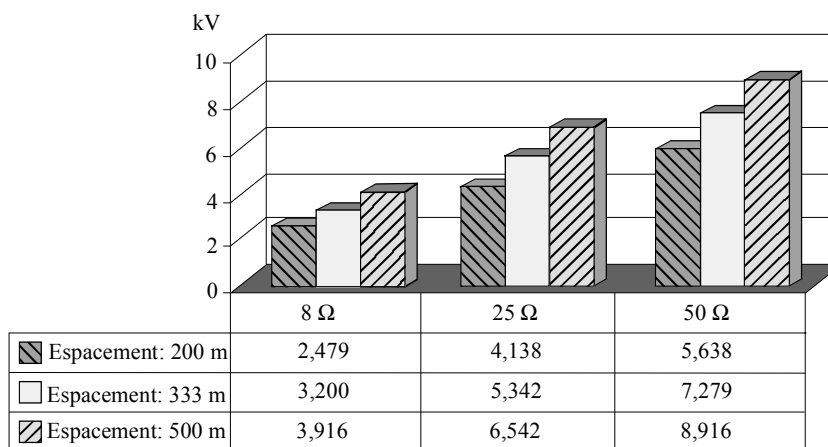
B Ligne à 400 kV
 L15 Longueur de ligne: L = 15 km
 F2 Emplacement de défaut: L/2 km
 Intensité de courant bifilaire 2 $\times$ 5 kA uniquement à gauche du défaut
 S1 Terre de sous-station: 0,1 Ω /0,1 Ω

K.057_Fl.11

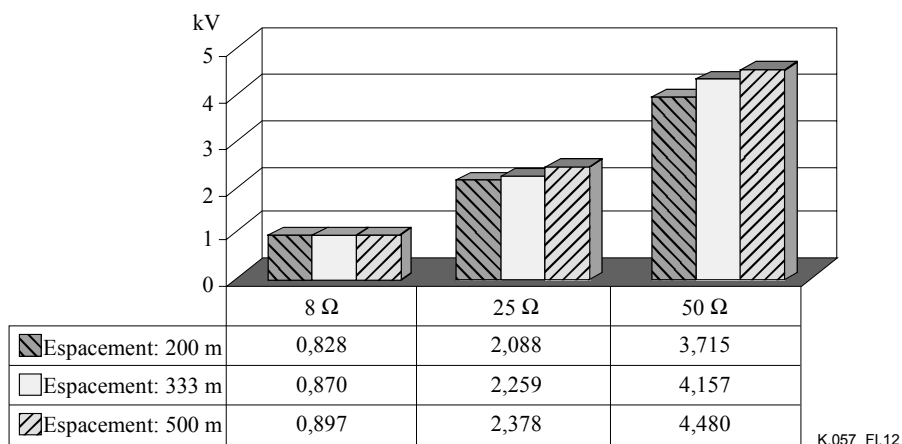
Figure I.11/K.57 – Elévation du potentiel de terre du pylône défectueux pour différents espacements de pylônes



a) 1 fil écran



b) 2 fils écrans



K.057_FI.12

c) 1 fil écran et 1 contrepoids

B Ligne de 400 kV
 L60 Longueur de ligne: L = 60 km
 F2 Emplacement de défaut: L/2 km
 Intensité de courant bifilaire 2×5 kA uniquement à gauche du défaut
 S1 Terre de sous-station: 0,1 Ω /0,1 Ω

Figure I.12/K.57 – Elévation du potentiel de terre du pylône défectueux pour différents espacements de pylônes

I.4 Estimation du niveau d'isolement requis

Le choix du niveau d'isolement requis pour le circuit d'alimentation électrique peut être coordonné avec l'élévation du potentiel de terre des pylônes des lignes de transport, sur la base de la montée en potentiel de terre du pylône défectueux, telle qu'elle a été observée pour les caractéristiques et les paramètres déterminants indiqués au Tableau I.1.

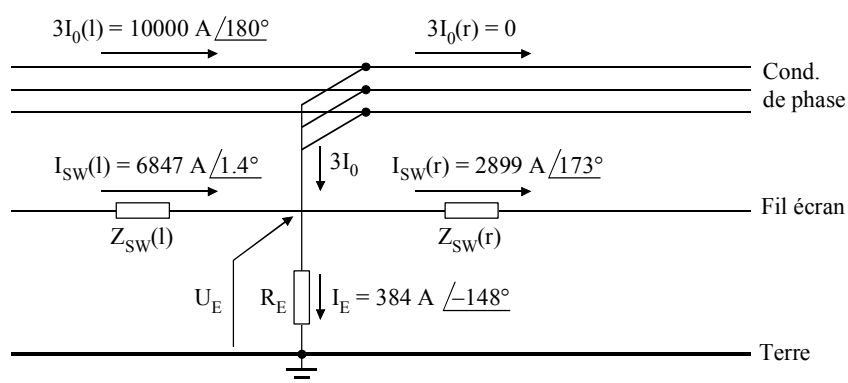
I.4.1 Représentation du circuit du pylône défectueux

Le schéma détaillé de la partie a) de la Figure I.13 montre comment obtenir non seulement le potentiel du pylône, mais aussi la répartition du courant au niveau du pylône défectueux à partir de la simulation de la ligne de transport d'énergie électrique – y compris le système de fils écrans. Ces valeurs de la tension et du courant permettent de définir l'impédance d'entrée des fils écrans, vue d'un côté et de l'autre, c'est-à-dire $Z_{sw}(1)$ et $Z_{sw}(r)$ et de leur valeur équivalente en montage parallèle, c'est-à-dire l'impédance directe équivalente du système de fils écrans vue du pylône défectueux (voir partie b) de la Figure I.13). Le Tableau I.13 indique les valeurs du vecteur de phase Z_{sw} , pour une intensité de courant de défaut unifilaire (1×10 kA); des valeurs identiques ont cependant été obtenues pour un courant de défaut bifilaire (2×5 kA), en dépit de la différence notable de répartition du courant circulant dans le fil écran.

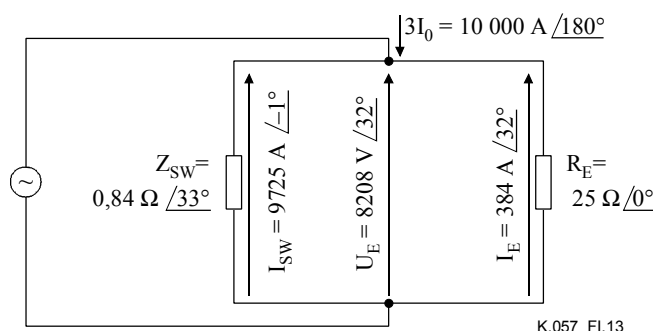
L'impédance directe est comprise entre 0,1 et 1,2, ce qui est relativement faible par comparaison à la résistance du dispositif de terre du pylône. En conclusion, l'élévation du potentiel d'un pylône donné est déterminée par la valeur moyenne des résistances de terre des cinq à dix pylônes voisins, plutôt que celle du pylône en question proprement dit. Autrement dit, l'élévation du potentiel T-EPR d'un pylône donné ne peut être notablement réduite si l'on se contente d'augmenter la résistance de ce seul pylône.

Tableau I.3/K.57 – Impédance directe vue du pylône défectueux

Résistance de terre [Ω]	Configuration des fils écrans					
	1 sw		2 sw		1 sw + cp	
	[Ω]	[Deg.]	[Ω]	[Deg.]	[Ω]	[Deg.]
8	0,491	33,2	0,336	23,5	0,090	19,9
25	0,844	33,5	0,570	25,7	0,232	20,3
50	1,162	38,5	0,752	31,8	0,435	22,8
sw fil écran						
cp contrepoids						



a) Schéma détaillé



b) Schéma équivalent

B Ligne de 400 kV avec un fil écran et sans contrepoids
R2 Résistance de terre du pylône: 25 Ω
L15 Longueur de: L = 15 km
S1 Terre de la sous-station: 0,1 Ω /0,1 Ω
Intensité de courant 1×10 kA uniquement du côté gauche du défaut

Figure I.13/K.57 – Représentation du circuit du pylône défectueux

I.4.2 Choix du niveau d'isolement coordonné en fonction de l'intensité du courant de défaut de terre

Le Tableau I.1 indique l'élévation du potentiel de terre du pylône défectueux pour neuf caractéristiques et paramètres déterminants, pour un courant de défaut de terre de 10 kA. Les coefficients correspondants à ces élévations du potentiel T-EPR sont reproduits au Tableau I.4 et pris en compte comme valeurs de base U_b permettant de coordonner le choix du niveau d'isolement.

Tableau I.4/K.57 – Valeur de base de l'élévation du potentiel de terre de pylône (T-EPR) utilisé pour coordonner le choix du niveau d'isolement

Résistance de terre [Ω]	Configuration du fil écran		
	1 sw [kV]	2 sw [kV]	1 sw + cp [kV]
8	4,663	3,237	0,872
25	8,208	5,589	2,290
50	11,413	7,432	4,316
sw fil écran			
cp contrepoids			

Les valeurs de base U_b de l'élévation du potentiel T-EPR permettent de déterminer les deux types de valeurs nominales suivantes:

- 1) la **tension d'isolement requise**, U_{is} pour une intensité donnée du courant de défaut de terre, peut être calculée comme suit:

$$U_{is} = U_b \frac{I_{ef}}{10} \quad [\text{kV}]$$

avec:

U_b U_b tension de base correspondant à la valeur moyenne de la résistance de terre et à la configuration de fil écran de la ligne étudiée, tirée du Tableau I.3;

I_{ef} courant de défaut de terre (en kA) du pylône de transport d'énergie électrique contenant la station de base considérée.

Par exemple, supposons les caractéristiques suivantes de la ligne de transport, dont le pylône contient la station de base:

- a) la ligne de transport est équipée de deux fils écrans;
- b) la valeur moyenne de la résistance de terre des pylônes est voisine de 25Ω ;
- c) le courant de défaut phase-terre correspondant au pylône sur lequel la station de base est installée: $I_{ef} = 21 \text{ kA}$.

La tension de base qui correspond aux deux premières caractéristiques est égale à: $U_b = 5,589 \text{ kV}$. Compte tenu de la troisième caractéristique, la tension d'isolement requise pour les installations d'alimentation électrique (transformateur d'isolement, câblage) est donnée par la formule:

$$U_{is} = 5,589 \frac{21}{10} = 11,737 \quad [\text{kV}] \quad (\text{I-1})$$

La tension d'isolement requise, une fois arrondie, est de 12 kV .

- 2) La **valeur admissible du courant de défaut phase-terre** I_{ef} correspondant à différents niveaux de tension d'isolement prédéfinis (U_{is}) peut être calculée par l'expression suivante:

$$I_{ef} = 10 \frac{U_{is}}{U_b} \quad [\text{kA}] \quad (\text{I-2})$$

avec:

U_b tension de base correspondant à la résistance de terre moyenne et à la configuration de fil écran de la ligne considérée, tirée du Tableau I.4;

U_{is} niveaux de tension d'isolement prédéfinis des installations d'alimentation électrique (transformateur d'isolement, câblage) dont la liste figure à la première colonne du Tableau I.5.

Du point de vue technique, on peut supposer que des transformateurs d'isolement fabriqués en série ont un niveau donné de tension d'isolement. Dans ce cas, la valeur admissible des courants de défaut de terre, en fonction des niveaux d'isolement disponibles, peut être déterminée en fonction de la résistance de terre moyenne et de la configuration de fil écran de la ligne électrique considérée, par la formule (I-2).

Supposons par exemple, une ligne d'énergie électrique dotée des caractéristiques ci-dessous, et dont un pylône contient la station de base:

- 1) la ligne est munie de deux fils écrans;
- 2) la valeur moyenne de la résistance de terre des pylônes est voisine de 25Ω .

Supposons en outre la troisième caractéristique suivante:

- 3) niveau de tension d'isolement des installations d'alimentation électrique (transformateur d'isolement, câblage), $U_{is} = 20$ kV.

La tension de base qui correspond aux deux premières caractéristiques est égale à $U_b = 5,589$ kV. Compte tenu également de la troisième caractéristique, dans le cas du pylône où se trouve la station de base, on a:

$$I_{ef} = 10 \frac{20}{5,589} = 35,785 \quad [\text{kA}]$$

La valeur arrondie de l'intensité admissible du courant du défaut de terre est de 36 kA, d'après la valeur indiquée à la 8^e ligne et à la 4^e colonne du Tableau I.5.

Tableau I.5/K.57 – Valeurs admissibles du courant de défaut de terre pour différents niveaux d'isolement

0	1	2	3	4	5
	Tensions d'isolement de l'alimentation électrique [kV]	Résistance de terre moyenne des pylônes [Ω]	Courant de défaut de terre admissible [kA] pour différentes configurations de fils écrans		
			1 sw [kA]	2 sw [kA]	1 sw + cp [kA]
1	10	8	21	31	115
2		25	12	18	44
3		50	9	13	23
4	15	8	32	46	172
5		25	18	27	66
6		50	13	20	35
7	20	8	43	62	229
8		25	24	36	87
9		50	18	27	46
10	50	8	107	154	573
11		25	61	89	218
12		50	44	67	116
sw	fil écran				
cp	contrepoids				

Les valeurs admissibles du défaut de terre sont déterminées pour des tensions d'isolement de 10 kV, 15 kV, 20 kV et 50 kV et pour les valeurs définies plus haut des paramètres de la ligne électrique; les résultats figurent aux lignes 1 à 12 et aux colonnes 3 à 5 au Tableau I.5.

Les tensions d'isolement requises doivent être choisies en fonction de l'intensité effective du courant de défaut de terre. Les valeurs de cette intensité sont généralement définies en termes de valeurs maximales, et de valeurs moyennes pour les différents niveaux de tension HT d'un réseau national.

Les valeurs maximales des courants de défaut concernent un défaut observé au niveau de la sous-station: des intensités aussi fortes n'affectent jamais la ligne proprement dite.

Appendice II

Guide sur le dispositif d'alimentation BT

II.1 Dispositif d'alimentation BT

L'alimentation se compose des éléments suivants (en allant du pylône au réseau d'alimentation, voir la Figure 1:

- 1) un transformateur d'isolement installé dans le coffret d'alimentation, du type BT/BT, c'est-à-dire 400 V/(400/230) V, de préférence monté en triangle ou en étoile (D/Y₀).

NOTE 1 – Le montage en triangle présente l'avantage de ne pas comporter de conducteur neutre, ce qui dispense d'un quatrième dispositif de protection contre les surtensions MT, et permet par ailleurs d'alimenter des charges non équilibrées;

- 2) le câble de connexion, dernière partie de la ligne d'alimentation électrique BT, qui pénètre dans la zone de montée en potentiel de terre, entre le coffret du transformateur d'isolement et le point de connexion. Sa longueur minimale doit être supérieure à la plus grande des deux valeurs suivantes, le rayon de la zone Z-EPR ou la largeur de l'emprise (en cas de chute) de la ligne haute tension (au moins 30 m).

NOTE 2 – La section de connexion peut être constituée d'un câble aérien dans le cas exceptionnel où les réglementations nationales autorisent les câbles aériens à l'intérieur de l'emprise des lignes HT;

- 3) le point de connexion désigne le point de branchement du câble de connexion et de la partie de ligne basse tension raccordée. La connexion doit être équipée des éléments suivants:

- un dispositif de protection contre les surtensions basse tension;
- une prise de terre à faible résistance (inférieure à 10 Ω);
- le cas échéant, des wattmètres;

- 4) la ligne de raccordement désigne la partie de la ligne d'alimentation BT comprise entre le point de branchement au réseau d'alimentation et le point de connexion.

NOTE 3 – Les câbles de raccordement peuvent alimenter également quelques usagers, en particulier si la longueur des câbles est importante (plusieurs centaines de mètres). Dans ce cas, il faut prévoir une très bonne prise de terre au niveau du point de jonction ou doter chaque usager d'un dispositif BT de protection contre les surtensions;

- 5) le point de raccordement peut se situer en n'importe quel emplacement d'un réseau public BT sinon, aux bornes BT d'un transformateur MT/BT utilisé exclusivement pour la station de base de radiocommunication, mais à condition qu'il soit situé en dehors de la zone d'élévation du potentiel de terre. Le raccordement doit être équipé des dispositifs suivants:

- un dispositif de protection contre les surtensions

NOTE 4 – Le dispositif de protection contre les surtensions est inutile lorsque des usagers munis d'un dispositif de ce type sont alimentés par le câble de branchement et qu'aucun wattmètre n'est installé au point de connexion.

- prise de terre à faible résistance (inférieure à 10 Ω)

NOTE 5 – Dans le cas d'un réseau TN (-C-S) BT l'impédance résultante vue du point de raccordement par rapport à la terre peut être assez faible sans qu'il soit nécessaire d'installer des électrodes de terre supplémentaires.

- appareils de mesure de la puissance électrique, le cas échéant

NOTE 6 – La puissance électrique peut être mesurée au point de raccordement uniquement lorsque aucun usager n'est approvisionné à partir de la ligne de raccordement.

NOTE 7 – Dans le cas d'une station RBS alimentée à partir d'un transformateur MT/BT situé dans la zone de montée en potentiel de terre et équipé d'un conducteur équipotentiel (voir Figure 5), le transformateur d'alimentation fait également office de transformateur d'isolement. Un dispositif de protection contre les surtensions de type BT, doit donc être installé dans le coffret d'alimentation de la station RBS avec un varistor MOS côté MT. (Ces dispositifs sont normalement installés pour protéger le transformateur contre les surtensions dues à la foudre venant de la ligne MT.)

II.2 Principes de protection

La protection du réseau d'alimentation BT exige une protection contre les surtensions à la fréquence du secteur (50 Hz) dues aux défauts de terre et aux tensions de choc dues à la foudre subies par le pylône sur lequel la station RBS est installée.

II.2.1 Protection contre les élévations du potentiel de terre à la fréquence du secteur

Le courant de défaut de terre provoque une élévation du potentiel des électrodes à la fréquence du secteur (50 Hz), sur le dispositif de terre du pylône proprement dit, ainsi qu'une élévation du potentiel de terre (Z-EPR) qui diminue progressivement autour du pylône. Le "Guide sur la coordination du niveau d'isolement nécessaire aux circuits d'alimentation électrique, et de l'élévation du potentiel de terre des pylônes des lignes de transport d'énergie électrique" tel qu'indiqué à l'Appendice I permet d'évaluer l'importance de l'élévation du potentiel T-EPR.

Le principe de protection appliqué consiste à isoler le système d'alimentation BT, à l'entrée de la zone Z-EPR, contre l'élévation du potentiel de terre. Le potentiel des conducteurs de la ligne d'alimentation est fixe par rapport à la terre éloignée. (Les conducteurs de phase sont mis à la terre par l'intermédiaire de la terre du neutre (dans les systèmes TN), tandis que le neutre et l'écran de câble, le cas échéant, sont directement mis à la terre.) L'enroulement primaire du transformateur d'isolement est également mis au potentiel de la terre éloignée, en raison de sa connexion métallique avec la ligne d'alimentation. D'autre part, le neutre de l'enroulement secondaire est connecté à la terre du pylône.

Dans les conditions ci-dessus, la protection peut être assurée par les dispositions appropriées ci-dessous:

- 1) Isolement de l'enroulement primaire (montage triangle) du transformateur d'isolement, par rapport au secondaire et au noyau de fer et par rapport à toute autre partie métallique de l'armoire.
- 2) Isolement des conducteurs de phase et de toute partie métallique (écran de conducteur neutre) du câble de connexion BT, par rapport à toute partie mise à la terre de l'armoire et du pylône, et par rapport à la terre, à l'intérieur de la zone E-EPR.
- 3) Résistance du dispositif de protection contre les surtensions à la fréquence du secteur (MOV ou dispositif similaire), c'est-à-dire choix approprié de sa tension nominale (U_r).

NOTE – La tension nominale (U_r) désigne la valeur efficace de la tension à la fréquence du secteur susceptible d'être appliquée pendant 10 s consécutives entre les bornes du dispositif de protection contre les surtensions, après une période préalable d'utilisation maximale (surtensions temporaires).

La tension de service continue (U_c) désigne la valeur maximale efficace de la tension à la fréquence du secteur, susceptible d'être appliquée de façon ininterrompue aux bornes du dispositif de protection contre les surtensions (soit 80% de U_r).

II.2.2 Protection contre les surtensions dues à la foudre

Lorsque la foudre frappe un pylône sur lequel une station RBS est installée, la plus grande partie du courant de foudre circule vers le sol à travers la prise de terre du pylône. Ainsi, on observe une élévation de potentiel similaire, mais de type impulsif, comparable à l'élévation EPR due aux courants de défaut de terre décrits plus haut. La valeur de l'élévation T-EPR impulsionnelle au niveau du pylône est déterminée en principe par le produit de l'intensité du courant dû à la foudre et

de la résistance de terre du pylône. Le domaine de variation observé correspond à une valeur de crête du courant de foudre de 10 à 100 kA, et à une impédance de terre de 5 à 20 Ω . L'élévation du potentiel de terre du pylône varie donc de 50 à 2000 kV (valeur de crête type: $50 \text{ kA} \times 10 \Omega = 500 \text{ kV}$).

II.2.2.1 Protection du transformateur d'isolement

La surtension impulsionnelle ci-dessus peut apparaître entre les enroulements, comme entre l'enroulement primaire et les parties mises à la terre du transformateur d'isolement. Il n'est pas possible de construire un transformateur doté d'un tel niveau d'isolement. Par exemple, un transformateur conçu pour offrir un niveau d'isolement de 20 kV à la fréquence du secteur, peut devoir résister à des tensions impulsionnelles de quelque 70 kV: il faut donc compenser la surtension impulsionnelle par des dispositifs de protection contre les surtensions, installés entre les bornes des enroulements primaires et le dispositif de terre du pylône, auquel le neutre de l'enroulement secondaire est également raccordé.

Le dispositif de protection contre les surtensions doit répondre aux spécifications suivantes:

- 1) Tension résiduelle maximale inférieure à la résistance aux tensions impulsionnelles dues à la foudre du transformateur d'isolement.

NOTE – La tension résiduelle maximale correspond à la valeur de crête maximale aux bornes du limiteur de surtensions à la valeur nominale du courant de décharge. Elle caractérise la capacité du dispositif à limiter le niveau de surtension.

La tension résiduelle maximale est généralement égale à trois fois U_r .

- 2) Tension nominale suffisamment élevée (U_r) afin d'assurer que le dispositif de protection contre les surtensions résiste à la plus forte élévation du potentiel de terre du pylône à la fréquence du secteur; compte tenu de la valeur possible de cette élévation (de 10 à 40 kV), il faut des dispositifs SPD MT pour protéger le transformateur d'isolement (généralement de type MOV).

L'observation de cette spécification s'avère particulièrement importante afin d'assurer le rétablissement du niveau d'isolement à la fréquence du secteur, suite à une surtension impulsionnelle due à la foudre.

- 3) Le courant de décharge nominal correspond à la plus forte valeur du courant dû à la foudre pour laquelle la protection est prévue. Le courant (I_{BT}) qui entre dans la ligne d'alimentation BT à travers les dispositifs de protection est une fraction du courant dû à la foudre (I_L) dont la valeur approchée peut être calculée en fonction de l'impédance montée en parallèle de la résistance de terre du pylône (R) et de l'impédance caractéristique de la ligne BT (Z_{BT0}) par la formule

$$I_{BT} = \frac{R}{R_E + Z_{BT0}} I_L \cong \frac{R}{100} I_L$$

Dans la dernière partie de cette formule l'impédance caractéristique de la ligne d'alimentation BT varie de 80 à 90 Ω , de telle sorte que $Z_{BT0} + R \cong 100 \Omega$.

II.2.2.2 Protection du câble de connexion

Les dispositifs de protection contre les surtensions de type MT raccordés aux bornes de l'enroulement primaire du transformateur d'isolement introduisent des tensions impulsionnelles dues à la foudre dans le câble de connexion. L'amplitude des surtensions introduites par rapport au pylône et par rapport à la terre au voisinage du pylône est égale à la tension résiduelle des dispositifs SPD MT. Par conséquent, la surtension appliquée au câble, c'est-à-dire entre les conducteurs de phase et la terre dans le cas d'un câble sans écran, ou entre l'écran et la terre dans le cas d'un câble à écran, est égale à la tension résiduelle des SPD MT au voisinage du pylône.

La détermination de la surtension appliquée au câble de connexion est plus difficile lorsqu'on s'éloigne du pylône. La surtension introduite par rapport à la terre éloignée correspond au potentiel impulsionnel dû à la foudre au niveau du pylône, réduit de la tension résiduelle à travers les dispositifs SPD MT. Cette valeur représente une surtension dont la valeur de crête est de quelques centaines de kV. Toutefois, la valeur de crête de l'onde impulsionnelle ne serait observée dans le câble que si l'onde pouvait franchir une distance suffisante pour que la valeur de crête soit atteinte en un point du câble d'alimentation BT, lequel est situé en dehors de la zone EPR. Or, le long de la ligne BT l'extension du front de l'onde est d'environ 300 m, même en supposant un front d'onde très raide, avec un temps de montée de 1 μ s. Le câble de connexion a généralement de 50 à 150 m de long (voir Appendice III). Ses conducteurs sont, soit fermés sur la terre par des dispositifs de protection contre les surtensions de type BT (conducteurs de phase), soit directement mis à la terre (conducteurs neutres et écrans, le cas échéant), ce qui réalise à toutes fins pratiques un court-circuit au niveau du point de connexion. Cette terminaison de type court-circuit crée une onde de tension réfléchiée qui tend à réduire l'onde incidente. La tension résultante reste inférieure à environ 1/10^e de la valeur de crête dans la mesure où le câble de connexion reste court.

Dans les conditions ci-dessus, on peut supposer que la surtension observée dans le câble BT n'est pas plus importante, même par rapport à la terre éloignée, c'est-à-dire en dehors de la zone EPR, par comparaison à la tension résiduelle des dispositifs SPD de type MT assurant la protection des transformateurs d'isolement. Toutefois, il convient de maintenir un niveau d'isolement important sur toute la longueur du câble de connexion.

Enfin, il y a lieu d'attirer l'attention sur le caractère qualitatif des indications ci-dessus, qui ne tiennent pas compte des effets d'un certain nombre de facteurs, par exemple l'élévation de potentiel au niveau de la prise de terre du point de connexion, et l'incidence de la ligne d'alimentation raccordée. Il est possible d'obtenir des valeurs nominales précises sur la base d'analyses quantitatives, notamment par une simulation du programme d'analyse de transitoires électromagnétiques (EMTP, *electromagnetic transient program*).

II.3 Choix des valeurs nominales adoptées pour les dispositifs de protection

Les valeurs nominales propres aux dispositifs de protection peuvent être déterminées suivant la procédure logique présentée ci-après.

II.3.1 Tension du transformateur d'isolement

- a) La tension d'isolement à 50 Hz de l'enroulement primaire du transformateur d'isolement, doit être supérieure à la valeur efficace maximale de l'élévation du potentiel de terre du pylône à la suite d'un défaut de terre. Elle est calculée théoriquement en fonction de l'intensité du courant de défaut de terre, de la valeur moyenne de la résistance de terre des pylônes, des fils écrans et du contrepoids. L'Appendice I donne des indications quant au choix du niveau d'isolement requis.
- b) Les valeurs suivantes des tensions d'isolement à la fréquence du secteur, entre les enroulements et entre l'enroulement primaire et les parties mises à la terre sont néanmoins applicables dans la plupart des cas:
 - 10 kV efficaces, dans la plupart des situations, jusqu'à un courant de défaut de terre de 20 kA;
 - 20 kV efficaces en présence d'une forte valeur moyenne des résistances de terre et lorsque l'intensité du courant de défaut de terre est très élevée, jusqu'à 40 kA.
- c) De plus, la résistance diélectrique aux tensions impulsionnelles de l'enroulement primaire doit être supérieure à la tension résiduelle des dispositifs SPD MT installés (MOV ou similaires). Ci-dessous figurent à titre indicatif les caractéristiques de dispositifs SPD MT types correspondant aux niveaux d'isolement mentionnés plus haut (Tableau II.1).

II.3.2 Caractéristiques des dispositifs SPD MT (MOV ou similaire)

- a) La tension nominale (U_r) du dispositif de protection contre les surtensions de type MT doit être égale ou supérieure à la valeur efficace maximale de l'élévation du potentiel de terre du pylône considéré, à la suite d'un défaut de terre.

Tableau II.1/K.57 – Caractéristiques des dispositifs SPD MT (varistor ou similaire) correspondant à deux niveaux types de tension du transformateur d'isolement

Niveau d'isolement du transformateur [kV eff]	Caractéristiques du dispositif de protection contre les surtensions MT (MOV)			
	Tension nominale, U_r [kV eff]	Tension de service permanente, U_c [kV eff]	Tension résiduelle avec une onde 8/20 μ s à	
			10 kA [kV de crête]	20 kA [kV de crête]
10	10	8	28	32
20	20	16	56	64

- b) La valeur nominale du courant de décharge doit correspondre à la valeur la plus élevée du courant de foudre, que le dispositif de protection doit détourner.

NOTE – Le courant de décharge nominal correspond à la valeur de crête d'un courant impulsionnel dû à la foudre, présentant un profil bi-exponentiel d'onde impulsionnelle 8/20, utilisé pour classer les dispositifs de protection contre les surtensions. La capacité d'absorption énergétique, exprimée en kJ/kV_{Uc}, permet également de caractériser la capacité de décharge du dispositif de protection.

Le courant détourné est une fraction du courant dû à la foudre. Sa valeur, en pourcentage, est sensiblement égale à la résistance de terre exprimée en Ω du pylône, sur lequel la station de base de radiocommunication est installée (voir II.2.2.1b)).

Un varistor MOS (MOV) dont le courant de décharge nominal est égal à 20 kA peut offrir une protection contre un courant dû à la foudre d'au moins 100 kA de valeur de crête, lorsque la résistance de terre est inférieure à 20 Ω . En présence de résistance de terre plus faible, les MOV dont les courants de décharge nominaux sont inférieurs à 20 kA peuvent assurer une protection appropriée.

II.3.3 Caractéristiques des dispositifs de protection contre les surtensions de type BT

Le courant de décharge nominal des dispositifs SPD de type BT doit être égal ou supérieur à celui des dispositifs SPD de type MT, pour des dispositifs BT installés entre chaque conducteur de phase et la terre au point de connexion, conformément aux indications du § II.3.2 b).

NOTE – Compte tenu du § II.3.2 b), le courant de décharge nominal du dispositif SPD BT installé doit être d'au moins 20 kA.

Dans d'autres cas, le choix et l'installation des dispositifs de protection contre les surtensions de type BT doivent se conformer aux spécifications indiquées dans la série de normes CEI 61643, en particulier, les normes CEI 61643-1, [II.1] et CEI 61643-12, [II.2].

II.3.4 Câble de connexion

II.3.4.1 Tension de tenue d'isolement

La tension de tenue d'isolement du câble de connexion relié à la terre doit être supérieure à la tension nominale et à la tension résiduelle du dispositif SPD de type MT installé (MOV) pour les surtensions considérées à la fréquence de secteur (voir valeurs indicatives figurant au Tableau II.2).

Ces tensions de tenue doivent être assurées entre les structures métalliques et la terre, aux points d'installation des dispositifs SPD MT, c'est-à-dire entre les conducteurs de phase et la terre pour l'option un, et d'autre part entre l'écran et la terre pour les options deux et trois.

NOTE – Les tensions de tenue requises entre les garnitures isolées et les parties mises à la terre du coffret d'alimentation peuvent être assurées en préservant des espacements suffisants. Ci-dessous figurent les valeurs minimales des espacements correspondant aux tensions maximales des appareils et aux niveaux d'isolement définis dans le norme CEI 71:

Tableau II.2/K.57 – Valeurs indicatives des tensions de tenue et des espacements prescrits

Tension maximale pour l'appareillage [kV eff]	Valeur nominale de la tension de tenue pour un choc dû à la foudre [kV de crête]	Espacement maximum (intérieur) [mm]
12	75	90
24	125	160

II.3.4.2 Longueur du câble de connexion

La longueur minimale du câble de connexion doit être supérieure à la plus grande des deux valeurs suivantes, soit le rayon de la zone EPR, soit la largeur de l'emprise (en cas de chute), le cas échéant, de la ligne de transport haute tension (au moins 30 m; des indications plus détaillées figurent à l'Appendice III).

Il convient par ailleurs, dans toute la mesure du possible, d'éviter de prolonger inutilement le câble de connexion afin de réduire le coût de cette section dont le niveau d'isolement est plus élevé, et pour empêcher l'apparition d'une surtension due au phénomène de propagation de l'onde (voir § II.2.2.2 et Appendice III).

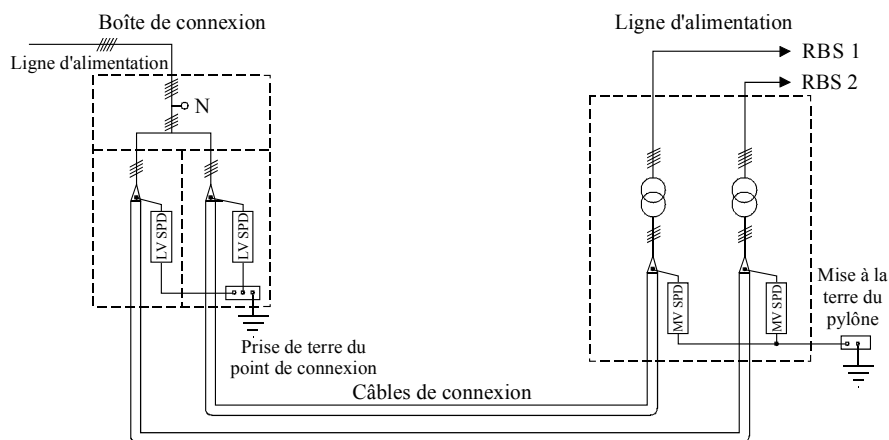
II.4 Options d'alimentation de plusieurs stations de base de radiocommunication

Dans certains cas, plusieurs stations de base de radiocommunication – par exemple exploitées par différents fournisseurs de service – peuvent être installées sur le même pylône. La Figure II.1 illustre les différentes options d'alimentation d'une telle installation à stations multiples, en supposant deux stations. Des éléments de plus en plus nombreux du réseau d'alimentation sont couramment utilisés lorsqu'on passe des options a) à c), ce qui entraîne une diminution du coût d'installation, mais en revanche une moindre souplesse d'exploitation et d'entretien.

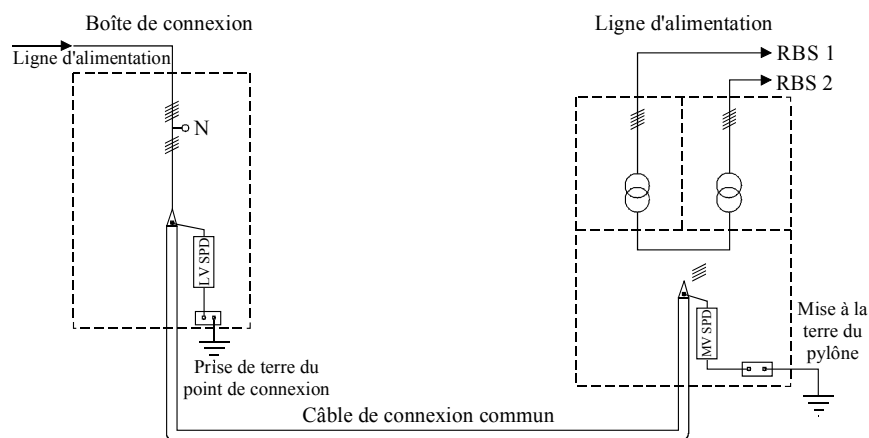
On peut caractériser comme suit les différentes configurations d'alimentation (Figure II.1):

- chaque élément de circuit est séparé, c'est-à-dire, dédoublé à partir du point de connexion jusqu'au coffret d'alimentation. Un compteur de consommation (kWh) distinct correspondant à chaque station de base peut être installé, soit au point de connexion, soit dans le compartiment individuel approprié du coffret d'alimentation. Il y a lieu de mentionner que les dispositifs de protection contre les surtensions BT peuvent théoriquement être combinés et remplacés par un ensemble unique raccordé à la dérivation commune (ligne d'alimentation);
- le câble de connexion, les dispositifs de protection de type MT et LT au niveau du coffret d'alimentation et enfin le point de connexion sont respectivement communs aux deux stations de base de radiocommunication; des compteurs de consommation distincts pour chaque station de base RBS ne peuvent donc être installés qu'au niveau des compartiments distincts correspondants dans le coffret d'alimentation;
- le câble de connexion, les dispositifs de protection contre les surtensions et le transformateur d'isolement font l'objet d'une utilisation commune. L'alimentation n'est individualisée que du côté de l'enroulement secondaire du transformateur d'isolement. Il est possible de mesurer la consommation de chaque station à l'aide de compteurs auxiliaires

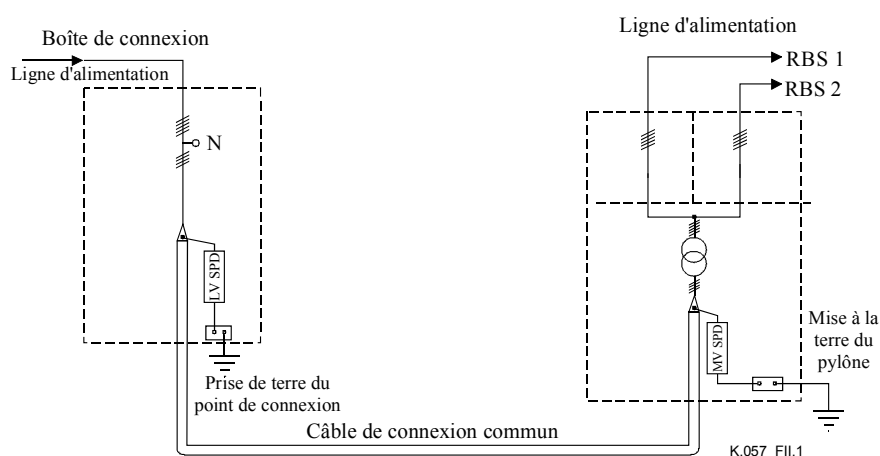
installés dans des compartiments distincts sur les câbles d'alimentation respectifs, du côté du secondaire. Enfin, il est possible d'installer un compteur commun de consommation – mesurant notamment les pertes du transformateur d'isolement – dans le compartiment côté primaire du coffret d'alimentation ou au niveau du point de connexion.



a) Alimentation distincte



b) Câble de connexion et dispositifs SPD communs (de types MT et BT)



c) Câble de connexion, dispositifs SPD et transformateur d'isolement commun

Figure II.1/K.57 – Options d'alimentation de plusieurs stations RBS installées sur le même pylône

Appendice III

Caractérisation et limitation de la zone EPR du réseau de terre des pylônes et estimation de la longueur minimale de la section de connexion

III.1 Caractérisation de la zone EPR de la prise de terre des pylônes

III.1.1 Elévation du potentiel de terre au voisinage des semelles de pylônes réelles

Le présent paragraphe section décrit les caractéristiques de la zone d'élévation du potentiel de terre (Z-EPR) observée autour de la semelle d'un pylône suite à l'introduction d'un courant dans le sol par le réseau d'électrodes de terre d'un pylône de ligne haute tension. Le présent paragraphe contient en outre une série de chiffres obtenus, d'une part, grâce à des mesures sur le terrain et, d'autre part, au moyen d'études de simulation.

Les courbes représentatives Z-EPR en fonction de la distance, (en pourcentage) rapporté au potentiel de terre (V_e), sont indiquées à la Figure III.1; elles ont été obtenues par des mesures sur le terrain autour d'une semelle de ligne de transport à 220 kV, les valeurs numériques correspondantes étant indiquées dans la partie b) de la Figure III.1. La partie a) des chiffres en question correspond au profil Z-EPR en fonction de la distance, à la surface du sol, dans les quatre directions spécifiées [III.1].

La partie b) de la Figure III.1 représente les courbes de potentiel normalisé, en échelle bilogarithmique, qui permet de mieux comparer les profils obtenus en s'éloignant de la semelle du pylône.

Les diagrammes à trois dimensions des valeurs Z-EPR de la Figure III.2 sont établis à deux échelles différentes. Ils ont été obtenus par simulation [III.2] du réseau de terre d'une ligne de 220 kV, dont la configuration est représentée à la Figure III.3.

Les courbes Z-EPR normalisées par rapport au potentiel du pylône, à une profondeur de 0,5 m, perpendiculairement au tracé de la ligne, de part et d'autre de l'axe des pieds du pylône, sont tracées pour deux valeurs de la résistivité du sol à la Figure III.4. Dans ce cas l'installation ne comporte pas de conducteur en anneau.

Les conclusions majeures suivantes peuvent être tirées d'un point de vue pratique, sur la base des informations présentées:

- au voisinage immédiat de la semelle du pylône, la montée en potentiel de terre varie très rapidement. Aussi est-il particulièrement important d'assurer la mise à la masse des différentes armoires (alimentation électrique et matériel de la station de base RBS), afin d'égaliser leur potentiel;
- la résistivité spécifique du sol affecte les valeurs du potentiel de terre, de T-EPR et Z-EPR, mais n'affecte ni les valeurs ponctuelles, ni la courbe des potentiels normalisés Z-EPR (Figure III.4);
- les différences observées entre les courbes Z-EPR obtenues dans différentes directions ne sont significatives qu'au voisinage immédiat de la semelle du pylône. Aux distances plus importantes, les courbes Z-EPR obtenues dans les différentes directions sont pratiquement identiques et se caractérisent par une diminution en fonction de la distance suivant une loi de type $1/x$ (hyperbolique). Cette dernière propriété autorise à toutes fins pratiques une représentation de la semelle du pylône par une demi-sphère équivalente.

III.1.2 Représentation de la zone Z-EPR par le concept de demi-sphère équivalente

Les publications techniques disponibles [III.3] montrent clairement la possibilité de déterminer Z-EPR par des formules très simples, lorsque l'électrode réelle est remplacée par une demi-sphère ou une demi-sphère équivalente.

Ces formules simples supposent par ailleurs un sol homogène au moins dans la couche en surface.

L'élévation de potentiel Z-EPR d'une électrode hémisphérique à une distance x est donné par la formule:

$$V_x = \frac{\rho}{2\pi x} I \quad (\text{III-1})$$

avec:

ρ résistivité du sol;

I intensité circulant dans l'électrode de terre.

Le potentiel de terre V_e du pylône devient alors:

$$V_e = R \cdot I \quad (\text{III-2})$$

avec R résistance de terre du pylône.

Si l'on calcule le rapport V_x/V_e on obtient l'expression:

$$\frac{V_x}{V_e} = \frac{\rho}{2\pi R} \frac{1}{x} \quad (\text{III-3})$$

Enfin, la distance minimale $x_{\min}$ mesurée depuis l'axe de l'électrode lorsque le potentiel de terre V_x est égal à une valeur précise, peut être obtenue par la formule:

$$x_{\min} = \frac{1}{2\pi} \frac{\rho}{R} \frac{V_e}{V_x} \quad (\text{III-4})$$

dans laquelle les valeurs suivantes sont supposées connues:

ρ résistivité spécifique de la couche de surface au niveau de la semelle du pylône sur lequel la station RBS est installée;

R résistance de terre du pylône de la station RBS (valeur considérée à l'Appendice I);

V_e élévation du potentiel du pylône de la station RBS (valeur obtenue d'après l'Appendice I);

V_x potentiel de terre admissible à l'extrémité éloignée de la section de connexion, c'est-à-dire au point de connexion.

Lorsque le tracé du câble de connexion est rectiligne, $x_{\min}$ est égal à la longueur minimale prescrite de la section de connexion.

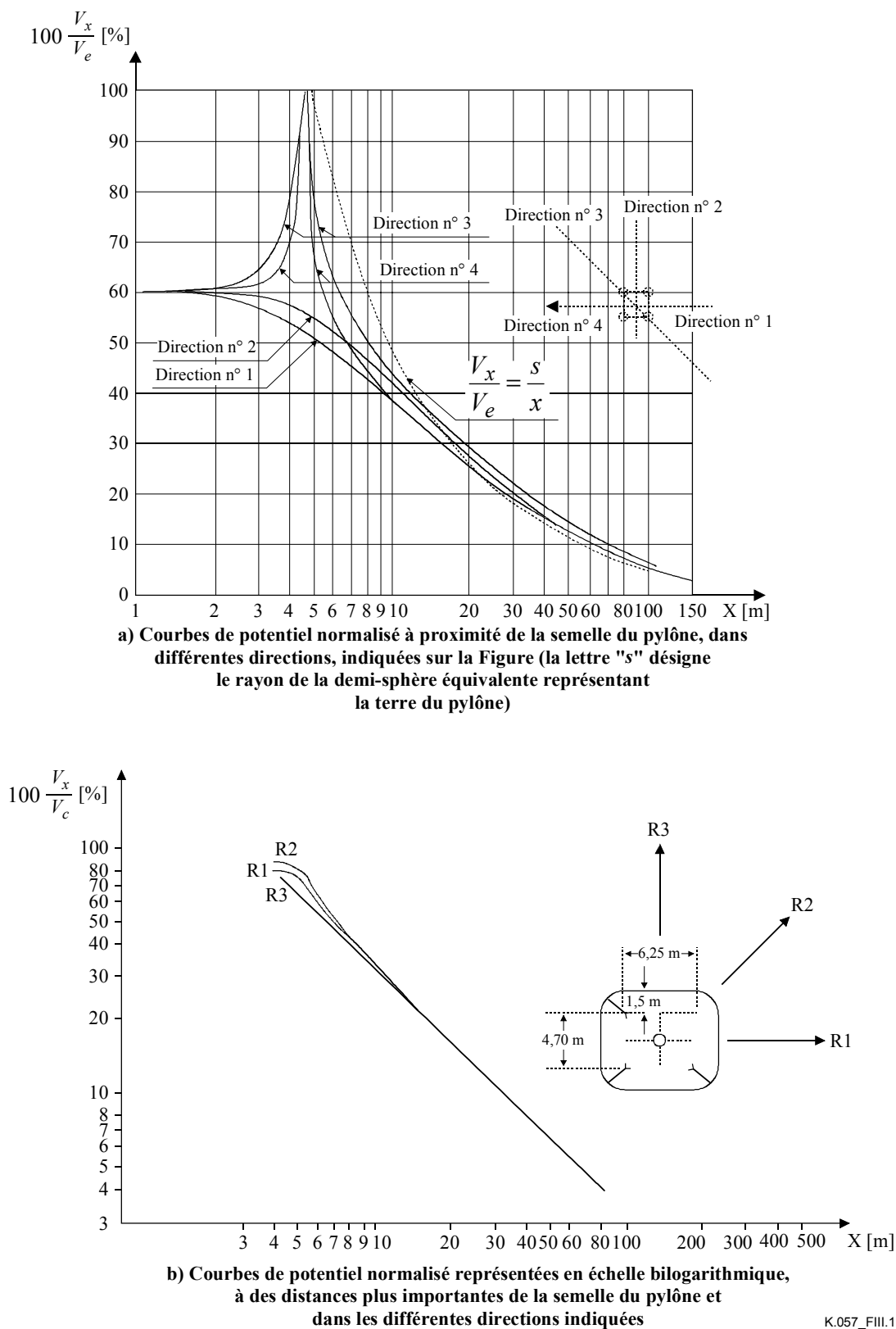
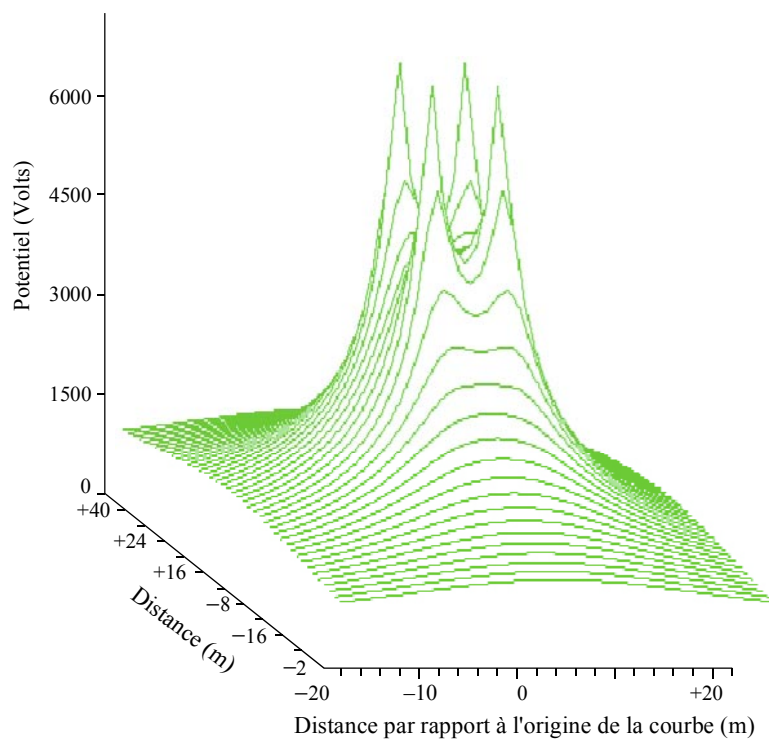
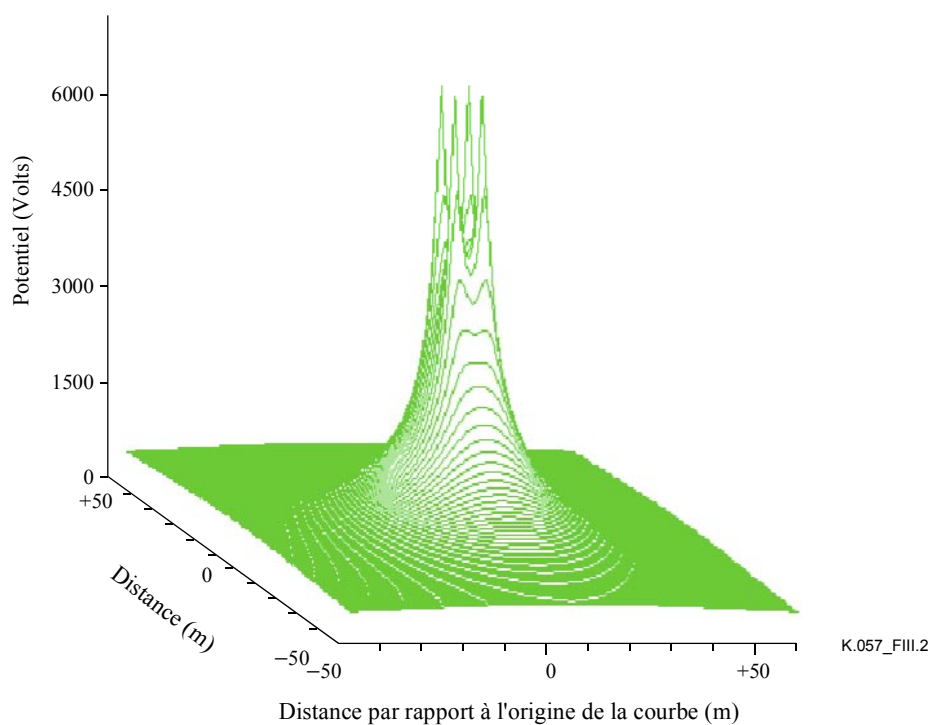


Figure III.1/K.57 – Elévation normalisée de potentiel Z-EPR, rapportée à un potentiel de terre (en pourcentage) mesuré au voisinage de la semelle d'une ligne de transport à 220 kV, dont les cotes sont indiquées à la Figure III.1 b



a) Zone représentée: 40×40 m



b) Zone représentée: 100×100 m

Figure III.2/ /K.57 – Diagrammes tridimensionnels Z-EPR à une profondeur de 0,5 m, pour $\rho = 1500 \Omega\text{m}$, intensité de courant de défaut de terre: 10 kA, nombre de fils de terre: 1, configuration de réseau de terre indiquée à la Figure III.3

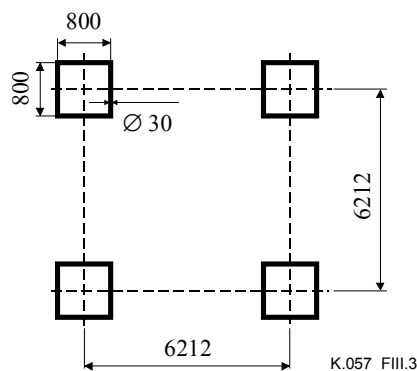


Figure III.3/K.57 – Configuration et cotes (en mm) des électrodes de terre de la ligne électrique à 220 kV prise en compte dans la simulation EPR – Profondeur des électrodes: 1,7 m

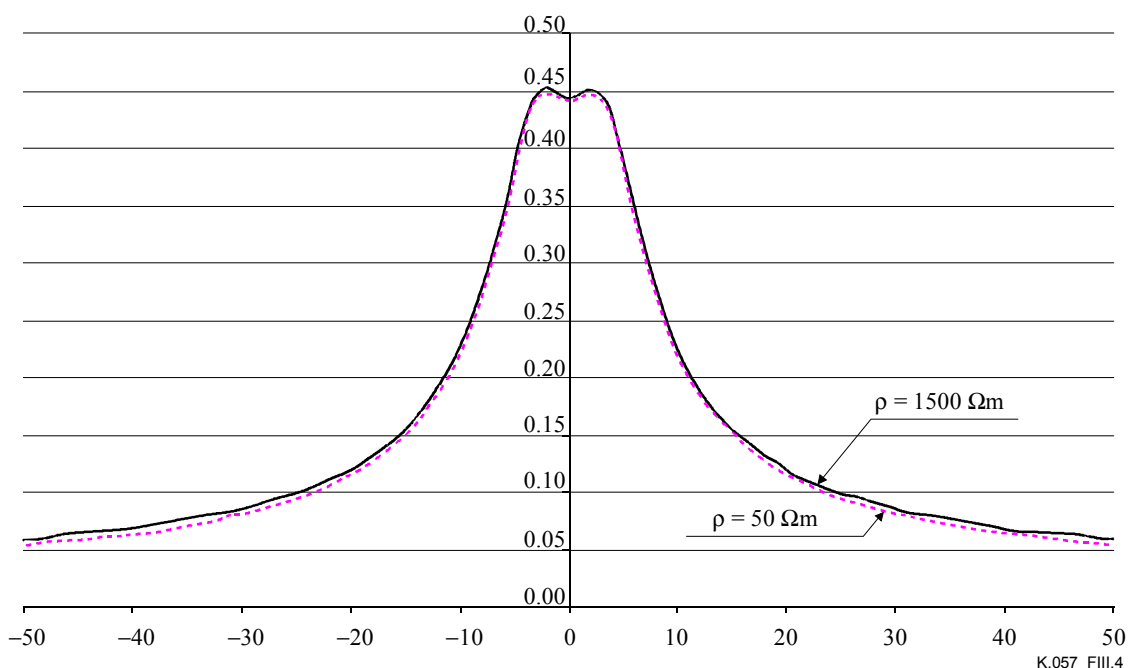


Figure III.4/K.57 – Courbes normalisées des valeurs Z-EPR (valeurs rapportées au potentiel de pylône à une profondeur de 0,5 m), perpendiculairement au tracé de la ligne, à partir du centre de la base du pylône

III.2 Limitation des tensions de toucher et de pas au moyen de dispositifs de terre PGE à répartition du potentiel

L'étude de l'élévation du potentiel Z-EPR a mis en évidence d'importantes différences de potentiel entre les pieds d'un pylône, comme au voisinage de celui-ci (voir Figures III.1, III.2 et III.4). Ces différences créent des tensions de toucher et de pas présentant un risque pour le personnel qui travaille à proximité de l'armoire de la station RBS. Les possibilités de limitation des tensions de toucher et de pas au moyen de dispositifs PGE sont étudiées ci-dessous.

III.2.1 Efficacité des dispositifs PGE

a) *Technique de simulation appliquée et principaux paramètres*

Les calculs de simulation ont utilisé le progiciel CDEGS (voir réf. [III.2]). Cette technique permet de prendre en considération la configuration réelle des électrodes de terre ainsi que la résistivité et la structure du sol (même dans le cas d'un sol stratifié).

Les calculs ont pris en compte les caractéristiques générales suivantes:

- sol homogène (résistivité spécifique $\rho = 50 \Omega\text{m}$);
- fréquence du secteur: 50 Hz (entrée de courant: 1 000 A, vers les pieds du pylône).

Il y a lieu de mentionner que les estimations ont pris en compte uniquement des valeurs normalisées, indépendantes de la résistivité spécifique du sol et du courant introduit.

b) *Configuration du dispositif de terre du pylône et simulation des électrodes de terre de répartition du potentiel*

La configuration des électrodes de terre du pylône est celle indiquée au Tableau III.1 sous la rubrique code 9. Les cotes sont indiquées à la Figure III.7. En fait, le réseau de terre du pylône est constitué de quatre électrodes carrées, installées à la partie inférieure de la semelle du pylône, et mises au même potentiel par l'intermédiaire du corps du pylône (Figure III.14). La configuration et les cotes du réseau de terre du pylône se caractérisent comme suit:

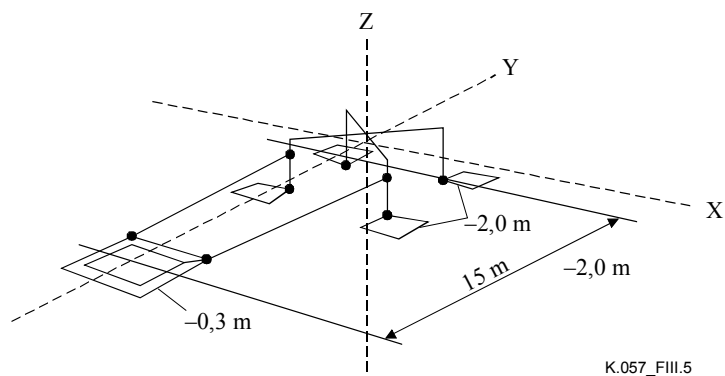
- matériau des électrodes: acier de section circulaire (diamètre: 30 mm);
- profondeur: 2,0 m;
- côté du carré formé par l'électrode associée à chaque pied: $1,7 \times 1,7 \text{ m}$;
- espace entre les axes des électrodes: 6,5 m.

La configuration des électrodes, ainsi que les cadres des électrodes de répartition du potentiel, pour une armoire installée d'une part sur le côté et d'autre part sous le pylône, sont représentés respectivement à la Figure III.5 et à la Figure III.6.

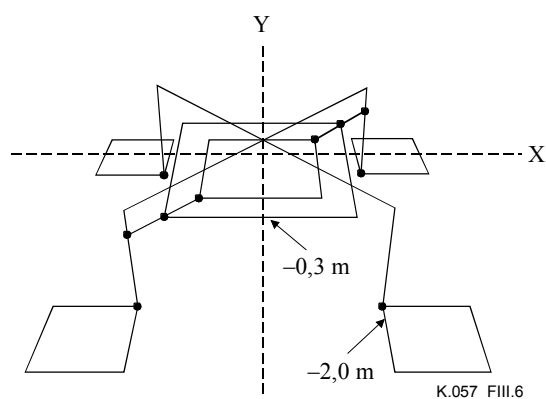
La structure et la configuration des réseaux d'électrodes à cadre de répartition du potentiel pris en compte dans la simulation, comportent les caractéristiques suivantes:

- matériau des électrodes: acier, section circulaire, diamètre 20 mm;
- profondeur: 0,3 m;
- emplacement par rapport au pylône:
 - latéral (Figure III.5);
 - sous le pylône, dans l'axe (Figure III.6);
- cotes du dispositif PGE (Figure III.7):
 - cadre extérieur $3,6 \times 3,6 \text{ m}$;
 - cadre intérieur $2,4 \times 2,4 \text{ m}$.

Les cotes du dispositif PGE sont les mêmes, quel que soit l'emplacement de l'armoire (latéralement ou sous le pylône). Lorsqu'il s'agit d'un dispositif unique, celui-ci est situé à l'extérieur.



**Figure III.5/K.57 – Configuration des électrodes de terre et du double cadre de répartition du potentiel.
Emplacement de l'armoire: latéral**



**Figure III.6/K.57 – Configuration des électrodes de terre et du double cadre de répartition du potentiel.
Emplacement de l'armoire: sous le pylône**

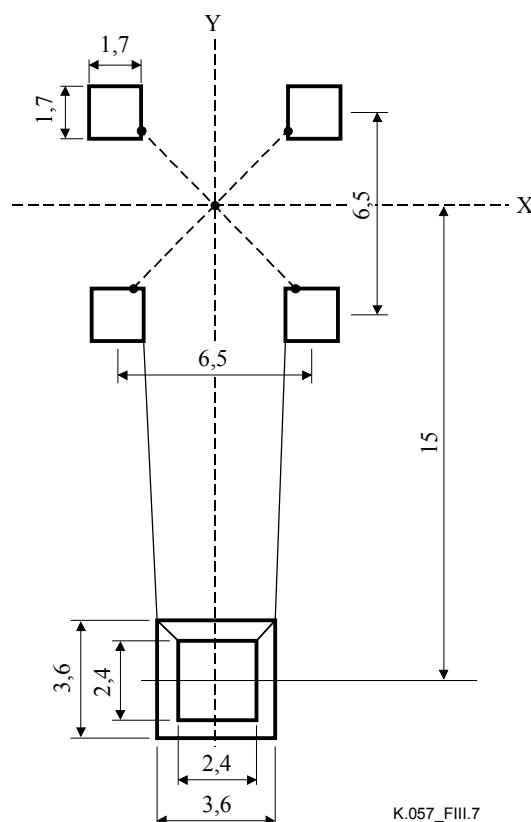


Figure III.7/K.57 – Cotes (en m) de l'électrode de terre du pylône et du double cadre de répartition du potentiel PGE

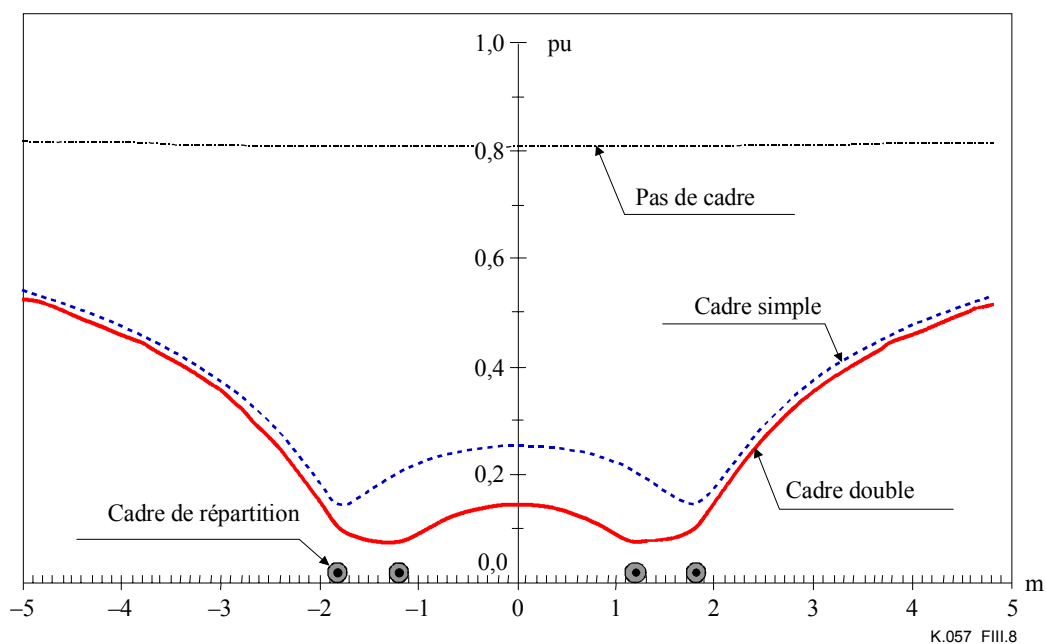
c) *Courbes de potentiel de surface et de tension de toucher*

Le programme CDEGS fournit une solution complète du champ électromagnétique, défini par le réseau d'électrodes et indiquant par exemple le potentiel, la distribution du courant, le champ électrique et magnétique en un point quelconque des abords du pylône. Ces résultats peuvent faire l'objet d'un traitement ultérieur, de façon à déterminer les tensions de toucher, les tensions de pas etc.

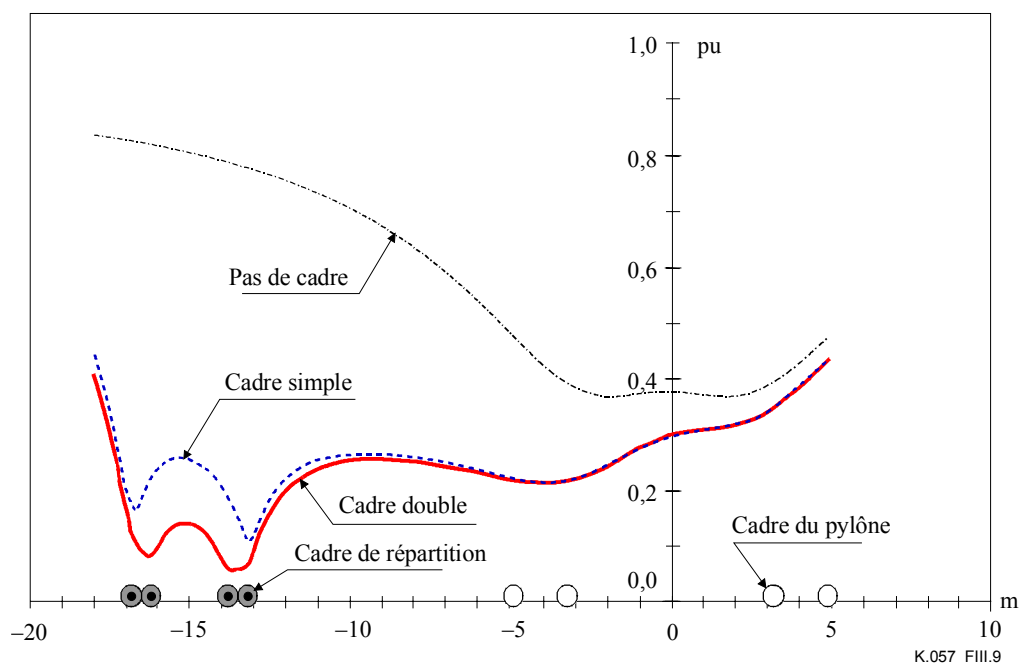
Le diagramme tridimensionnel donne un aperçu général du niveau de potentiel en un point quelconque du sol, par exemple tel qu'indiqué à la Figure III.2.

En ce qui concerne l'analyse quantitative des résultats, les courbes de potentiel de surface du sol par rapport à la terre éloignée et de tension de toucher, entre la prise de terre de l'armoire (mise à la masse du pylône) et la surface du sol à proximité, sont indiquées en fonction de la distance dans les trois axes du repère, pour les deux emplacements considérés de l'armoire:

- latéral (Figures III.8, III.9 et III.10);
- sous le pylône (Figures III.11, III.12 et III.13).



**Figure III.8/K.57 – Courbe de tension de toucher (pu, base: T-EPR) armoire latérale.
Courbe: direction X, dans l'axe du cadre de répartition du potentiel**



**Figure III.9/K.57 – Courbe de tension de toucher (pu, base: T-EPR) armoire latérale.
Courbe: direction Y, axe du cadre de répartition et des électrodes de terre du pylône**

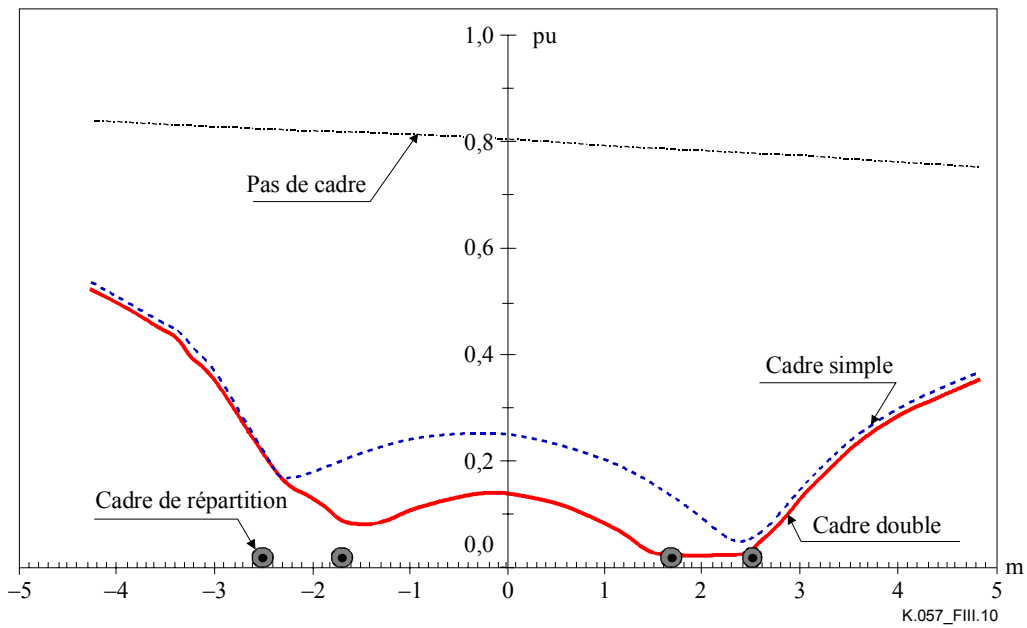


Figure III.10/K.57 – Courbes de tension toucher (pu, Base: T-EPR) coffret latéral.
Courbe: orientation à 45° depuis le centre du cadre de répartition du potentiel

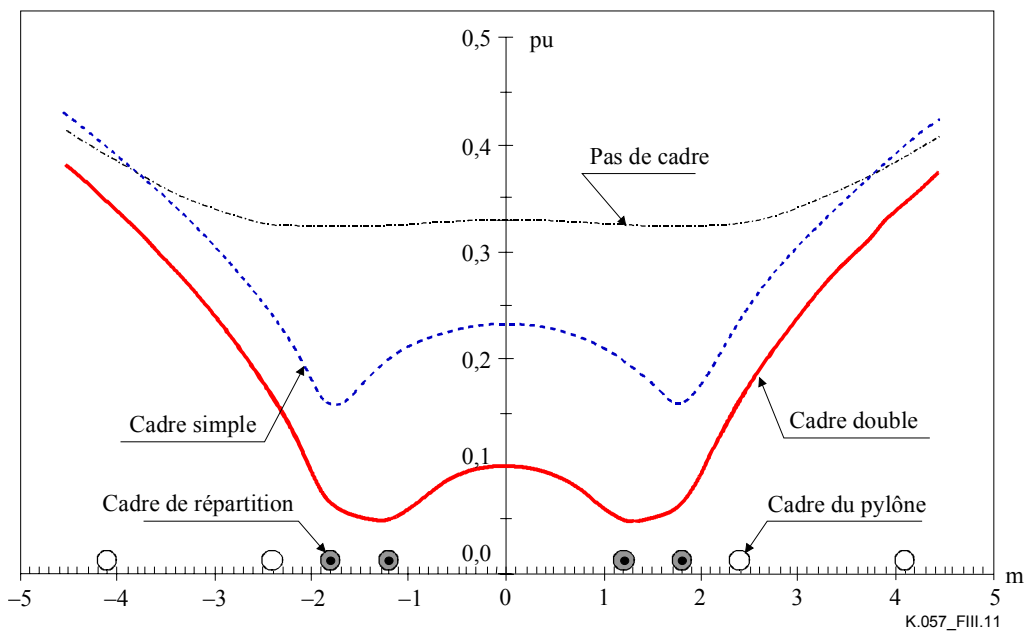


Figure III.11/K.57 – Courbe des tensions de toucher (pu, Base: T-EPR)
armoire installée sous le pylône.
Courbe: direction X, dans l'axe du cadre PGE

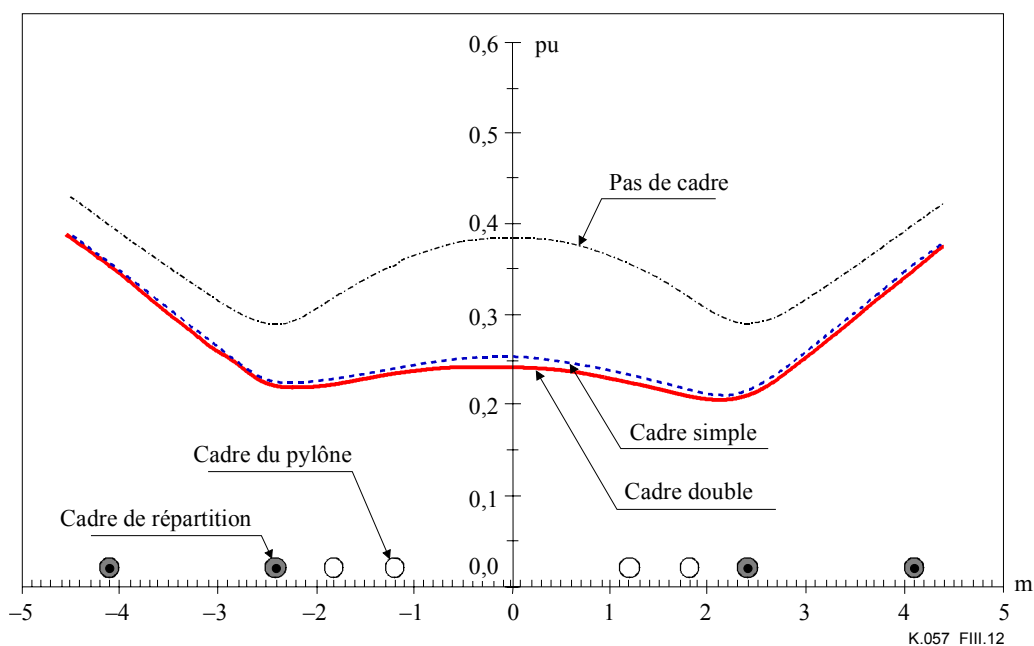


Figure III.12/K.57 – Courbes de tension de toucher (pu, Base: T-EPR) coffret installé sous le pylône.

Courbe: direction X, dans l'axe des électrodes de terre du pylône

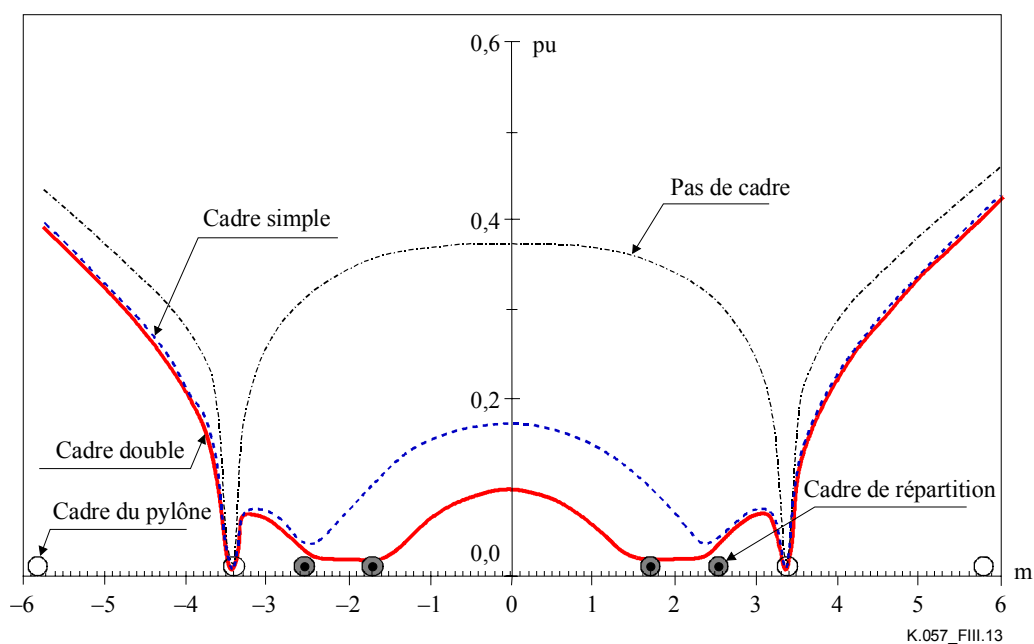


Figure III.13/K.57 – Courbes de tension de toucher (pu, Base: T-EPR) coffret installé sous le pylône.

Courbe: suivant une orientation à 45° depuis le centre du cadre d'électrode de répartition du potentiel

Les courbes sont établies pour les options suivantes, de façon à évaluer l'efficacité du cadre de terre de répartition du potentiel:

- pas de cadre PGE (courbe marron en trait plein);
- cadre simple PGE (courbe bleue en pointillé);
- cadre double PGE (courbe rouge en trait plein).

Les potentiels d'électrode sont indiqués ci-dessous et correspondent aux conditions de base indiquées plus haut au paragraphe III.2.1 a):

Emplacement de l'armoire	Potentiels d'électrode (en V)		
	Cadre PGE installé		
	Pas de cadre	Cadre simple	Cadre double
Sous le pylône	2746	2554	2530
Latéral	2746	1870	1844

Il y a lieu de signaler que la résistance de terre du réseau d'électrodes est obtenue en divisant les tensions ci-dessus par une intensité de 1 000 A.

Compte tenu du fait que les courbes correspondent à des valeurs normalisées, ni la valeur de ρ , ni l'intensité du courant introduit n'affectent les résultats.

L'échelle verticale du diagramme est exprimée en grandeurs unitaires (pu). La base correspond à l'élévation du potentiel de l'électrode (T-EPR).

Des petits cercles pleins ou vides au-dessus de l'échelle horizontale indiquent l'emplacement du cadre de répartition du potentiel ou du treillis de mise à la terre du pylône, le long de l'axe étudié. Ces indications facilitent l'analyse quantitative de l'efficacité du dispositif installé d'électrodes de répartition.

Il est facile de recalculer la valeur unitaire pour une tension correspondant à une configuration de ligne réelle, sur la base des informations fournies à l'Appendice I, en particulier au Tableau I.1.

Par exemple, considérons une tension de toucher $u_t = 0,15$ pu (ce qui correspond à la Figure III.8), c'est-à-dire à une armoire latérale, installée juste au-dessus d'un cadre simple de répartition.

Le pylône où se trouve la station RBS fait partie d'une ligne de transport dont les caractéristiques sont les suivantes:

- 1) résistance de terre moyenne du pylône: 25 Ω ;
- 2) deux fils écrans;
- 3) espacement moyen de 330 m (pas de correction en fonction de l'espacement);
- 4) courant de défaut phase-terre $I_{ef} = 15$ kA.

L'élévation du potentiel de terre du pylône, d'après le Tableau I.1, compte tenu des caractéristiques 1) et 2) est égal à: $U_b = 5589$ V/10 kA.

On obtient alors la tension de toucher, compte tenu de l'intensité indiquée en 4):

$$U_t = u_t \times U_b \frac{I_{ef}}{10} = 0,15 \times 5589 \frac{15}{10} = 0,15 \times 8384 = 1258 \text{ V}$$

Les tensions de toucher correspondant aux trois options de cadre PGE étudiées sont alors:

Tension de toucher	Cadre PGE installé		
	Pas de cadre	Cadre simple	Cadre double
Valeur unitaire	0,805	0,15	0,08
Tension réelle (en V)	6751	1258	671

d) *Analyse des résultats*

Les courbes présentées démontrent clairement l'efficacité des cadres PGE en termes de limitation des tensions de toucher et de pas. L'effet du cadre PGE est observé sur le côté de l'armoire d'après les courbes obtenues suivant la direction X, à partir de l'axe vertical du cadre PGE (Figures III.8 et III.11), et par ailleurs au voisinage de l'angle de l'armoire dans les courbes relevées suivant une direction orientée à 45° (Figures III.10 et III.13). La courbe relevée suivant la direction Y, pour cette configuration, avec une armoire installée sous le pylône (Figure III.9), donne les valeurs obtenues respectivement au voisinage de l'armoire, et près des pieds du pylône.

1) *Phénomène de réduction de la tension de toucher dû à la répartition du potentiel*

L'effet atténuateur des cadres de répartition peut se caractériser par les valeurs suivantes de la tension de toucher:

Cadre de répartition	Domaine de variation de la tension de toucher	Remarques
Aucun	0,33 à 0,4 à 0,8 ^(*)	^(*) Armoire latérale
Cadre simple	0,15 à 0,20	Armoire installée au-dessus du cadre
Cadre double	0,05 à 0,10	Coffret installé dans la zone située au-dessus des cadres

L'effet atténuateur des cadres de répartition du potentiel sur la tension de toucher peut se résumer comme suit:

- l'installation d'un cadre simple de type PGE se traduit par une tension de toucher limitée par un coefficient de 0,5, par rapport à la configuration ne comportant aucun cadre PGE. Ce phénomène intervient dans une zone étroite située juste au-dessus de l'électrode PGE. Le coefficient d'atténuation peut même être inférieur à 0,25 lorsque l'armoire est placée sous le pylône;
- l'installation d'un deuxième cadre de répartition du potentiel permet de réaliser une limitation supplémentaire suivant un coefficient de 0,33 à 0,50. Cette limitation concerne une zone plus étendue au-dessus des doubles cadres PGE.

2) *Effet du cadre PGE sur la tension de pas*

la tension de pas est obtenue en calculant le gradient (pente) des courbes de potentiel de terre. On peut caractériser comme suit l'effet d'un réseau d'électrodes PGE sur les tensions de pas:

- l'installation de cadres de répartition n'affecte pratiquement pas les tensions de pas en dehors du cadre extérieur (voir par exemple Figures III.11 et III.12);
- la tension de pas est notablement réduite dans la zone située au-dessus des doubles cadres PGE;
- la tension de pas en dehors du cadre extérieur est pratiquement identique avec des réseaux de cadres simples et de cadres doubles.

III.2.2 Conclusions et suggestions

a) *Conclusions*

L'installation d'un réseau d'électrodes PGE réduit effectivement la tension de toucher par rapport à l'armoire. Il s'agit d'un important enjeu de sécurité pour le personnel présent à proximité d'une armoire de station de base de radiocommunication. Par conséquent, l'usage de ce type de dispositif

est justifié en tout état de cause et absolument nécessaire dans le cas des armoires voisines des pylônes.

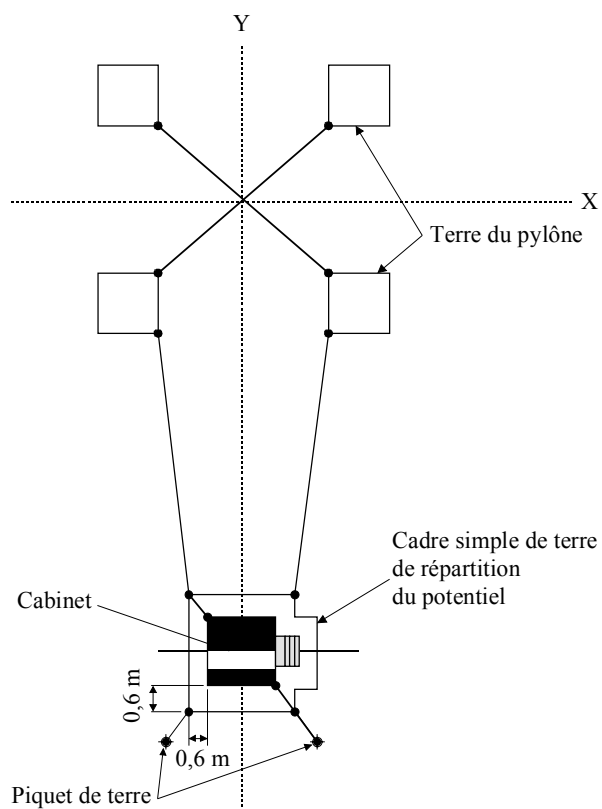
Les réseaux d'électrodes PGE réduisent également la tension de pas. Toutefois, avec un cadre PGE simple, ce phénomène est limité à une zone située immédiatement au-dessus de l'électrode PGE. La tension de pas est réduite plus efficacement au moyen d'un cadre double, en particulier dans la zone située au-dessus de ce type de dispositif.

En revanche les réseaux d'électrodes PGE ne réduisent pas la tension de pas à l'extérieur du cadre; il convient de signaler que cette diminution de la tension de pas n'y constitue pas un enjeu de sécurité majeur. Une tension de pas similaire peut d'ailleurs être observée au voisinage de tout pylône de ligne haute tension, sans qu'aucune mesure ne soit prise pour la réduire; de fait, comme on a pu l'observer sur une longue durée, aucun dommage personnel n'a été signalé en rapport avec les tensions de pas susceptibles d'être constatées au voisinage des pylônes des lignes de transport.

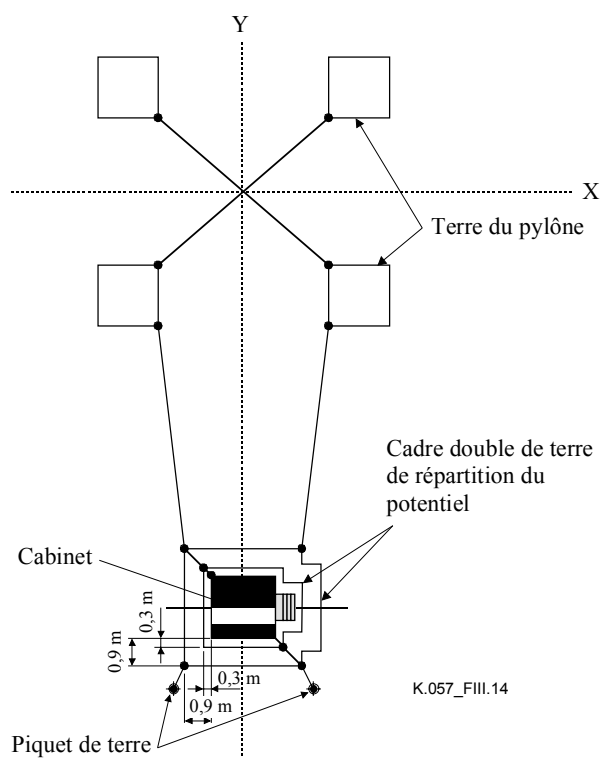
b) *Suggestions d'utilisation des réseaux d'électrodes PGE*

Afin d'éviter des niveaux dangereux des tensions de pas et des tensions de toucher, à proximité et à l'intérieur de l'armoire d'équipement, celle-ci doit être entourée par des cadres PGE. Les dispositions d'électrodes sont indiquées pour deux emplacements types, c'est-à-dire sous le pylône ou à côté (Figures III.14 et III.15, respectivement). Les recommandations suivantes sont applicables à la mise en place du réseau d'électrodes PGE:

- les électrodes de terre doivent être posées à une profondeur de 0,3 m;
- les conducteurs des électrodes doivent avoir une section minimale de $3,5 \times 30$ mm de tôle d'acier zingué ou une section circulaire de 20 mm de diamètre;
- l'électrode PGE doit être mise à la masse de la terre de l'armoire et des pieds du pylône, au moins en deux points diagonalement opposés, lorsque l'armoire est installée sous le pylône (voir Figure III.14);
- si nécessaire, deux prises de terre verticales doivent également être installées et raccordées au dispositif de terre;
- en cas d'utilisation d'un cadre PGE simple, il convient de l'installer autour de l'armoire à une distance de 0,6 m, marches métalliques incluses s'il y a lieu;
- en cas d'utilisation d'un double cadre de terre PGE, celui-ci doit être placé à $\pm 0,3$ m de l'axe présumé, à une distance de 0,6 m de la périphérie de l'armoire, de telle sorte que les prises de terre des cadres intérieur et extérieur soient installées à 0,3 m et 0,9 m respectivement autour de l'armoire. Le recours à ce type d'installation de terre à double cadre est préférable en présence de conditions rigoureuses, se traduisant par une forte élévation de potentiel, notamment dans le cas des armoires installées latéralement.



a) Installation d'un cadre PGE simple



b) Installation d'un cadre PGE double

Figure III.14/K.57 – Configuration d'un système d'électrodes PGE dans le cas d'un coffret installé sur le côté du pylône

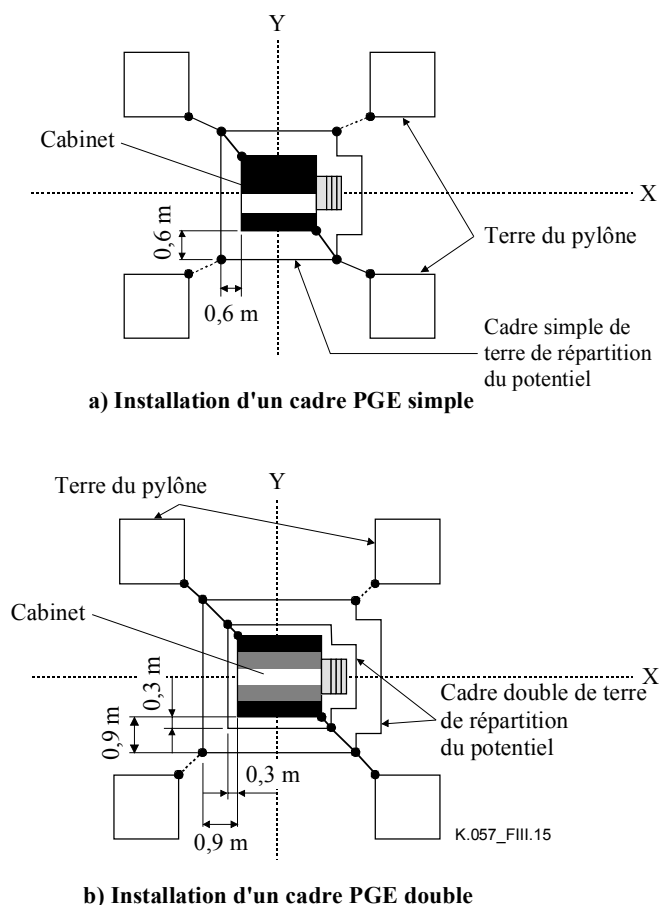


Figure III.15/K.57 – Configuration d'un système d'électrodes PGE dans le cas d'une armoire installée sous le pylône

III.3 Estimation des longueurs minimales

A titre indicatif, des estimations ont été faites pour des potentiels d'électrode de terre égaux aux tensions d'isolement pris en considération à l'Appendice I.

L'estimation des longueurs minimales au moyen de la relation III-4 exige la connaissance du rapport ρ/R . Ce calcul repose sur l'hypothèse consistant à représenter la résistance de terre R du pylône par une demi-sphère équivalente. La relation ci-dessous est applicable entre le rayon équivalent r_{eq} de la demi-sphère et R :

$$R = \frac{\rho}{2\pi r_{eq}} \quad (\text{III-5})$$

On obtient l'expression suivante pour le rapport ρ/R à partir de la formule ci-dessus:

$$\frac{\rho}{R} = 2\pi r_{eq} \quad (\text{III-6})$$

La relation III-6 montre clairement que la valeur ρ/R est dans un rapport 2π avec r_{eq} .

La méthode ci-dessous permet de calculer ρ/R . Le réseau de terre de la semelle de pylône, est globalement simulé au moyen du programme CDEGS [III.2] pour une série de configurations (en fait pour 21 cas différents). Les calculs supposent l'introduction dans le réseau d'électrodes d'un courant de 1000 A (valeur arbitrairement choisie). Le programme CDEGS résout le problème du calcul du champ électromagnétique créé par le réseau d'électrodes correspondant aux données d'entrée, installé dans un sol homogène d'une résistivité spécifique donnée ρ . (Le programme

CDEGS permettrait aussi d'effectuer les calculs pour un sol constitué de strates.) Une valeur de ρ égale à $50 \Omega\text{m}$ a été arbitrairement choisie pour la simulation. Parmi les résultats obtenus figure l'élévation du potentiel de l'électrode par rapport à la terre éloignée. La résistance de terre, R du réseau de terre du pylône est calculée par définition comme étant égale au rapport de l'élévation de potentiel calculée et du courant d'entrée considéré soit $1\,000\text{ A}$. A partir de la valeur de R calculée et de la valeur supposée de ρ , on obtient le rapport ρ/R pour chaque configuration simulée d'électrodes de terre. Il y a lieu de signaler que le rapport ρ/R est indépendant de ρ et du courant d'entrée pris en compte dans la simulation.

La disposition et les cotes géométriques de l'électrode de terre de chaque pied de pylône sont indiqués à la Figure III.16.

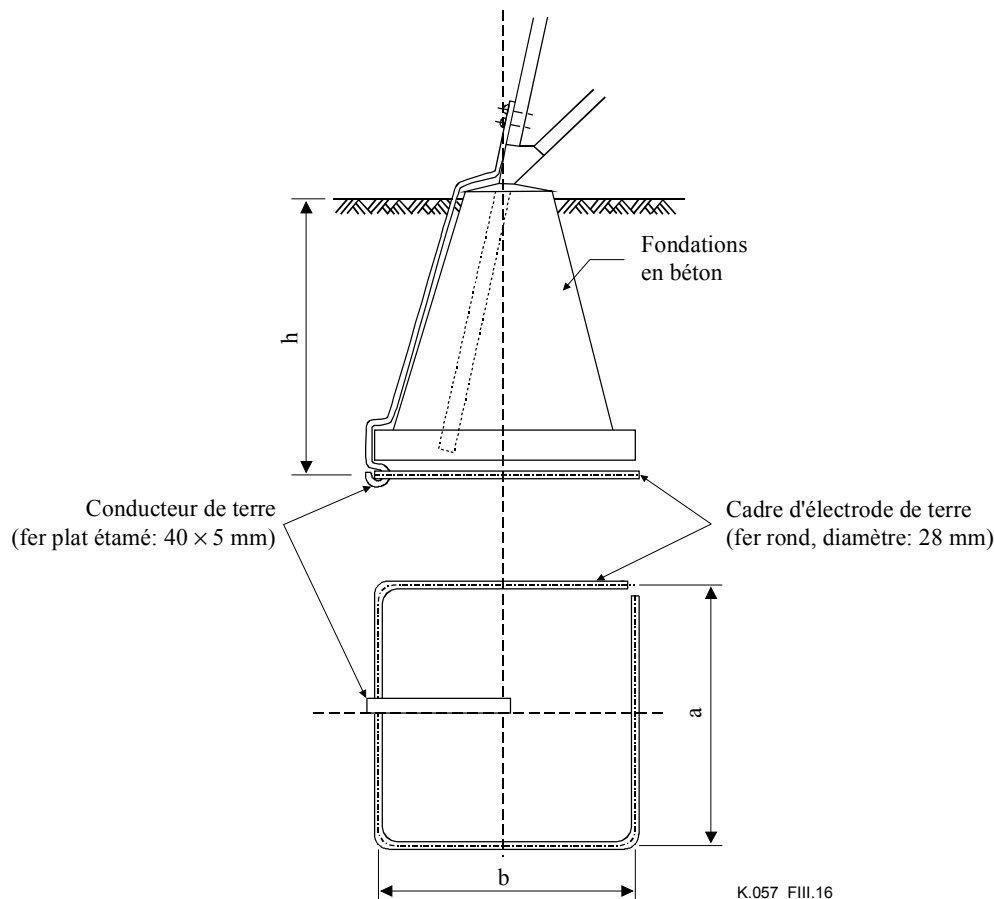


Figure III.16/K.57 – Configuration et cotes géométriques de l'électrode de terre d'un pied de pylône

Les fondations d'un pylône sont constituées soit de quatre pieds (tel est généralement le cas pour un pylône autoporteur), soit de deux pieds (généralement dans le cas d'un pylône à double croisillon, en H). Les calculs correspondant à ces deux possibilités ont été faits pour des configurations d'électrode de terre comportant quatre ou deux cadres (voir 1^{ère} colonne du Tableau III.1). L'espacement des pieds (f_1 et f_2) du pylône, les dimensions latérales (a et b) du cadre et la profondeur d'installation de l'électrode de terre définissent les cotes géométriques des réseaux d'électrodes considérés, tel qu'indiqué au Tableau III.1.

Les valeurs ρ/R calculées pour 21 configurations de réseau de terre sont consignées dans la dernière colonne du Tableau III.1. Avec $\rho/R = 18$, ce qui correspond à près de la moitié des valeurs dudit tableau, on obtient dans la formule III-4:

$$x_{\min} = \frac{1}{2\pi} 18 \frac{V_e}{V_x} = 2.9 \frac{V_e}{V_x} \quad (\text{III-7})$$

Si l'on considère:

- les potentiels d'électrode de terre pour les tensions d'isolement utilisées à l'Appendice I:
 $V = 10 \text{ kV}, 15 \text{ kV}, 20 \text{ kV}$ et 50 kV
- les potentiels de terre admissibles stipulés à vide, au niveau de l'armoire de conversion pour des câbles de télécommunication en cuivre ou au niveau des points de connexion:

$$V_x = 650 \text{ V ou } 1 \text{ kV}, 1.5 \text{ kV et } 2 \text{ kV}$$

les longueurs minimales de la section de connexion tirées de la formule III-7 sont alors indiqués au Tableau III.2.

Tableau III.1/K.57 – Valeurs types du paramètre ρ/R pour différentes configurations des dispositifs de terre des pylônes

Terre des pylônes							ρ/R	
Configuration	Niveau de tension type [kV]	Code	Cotes du cadre d'électrodes [m]					
			Espacement des pieds ^{a)}		Cotes latérales ^{b)}			Profondeur
			f_1	f_2	a	b		
<								

Tableau III.2/K.57 – Longueurs minimales prescrites de la section de connexion correspondant aux tensions d'isolement (Appendice I) et aux valeurs admissibles de l'élévation du potentiel Z-EPR au point de connexion

Tension d'isolement V [kV]	Longueur minimale [m]			
	jusqu'au coffret de conversion pour câble de télécommunication en cuivre ^{a)}	de la section de connexion		
		Valeur admissible au point de connexion V_x		
	650 V	1 kV	1,5 kV	2 kV
10	44	29	19	14
15	67	43	29	22
20	28	58	39	29
50	221	144	96	72
^{a)} Voir Figures 5 et 6.				

BIBLIOGRAPHIE

- [I.1] SOLLERKVIST (F.J.), VARJU (G.), KÁROLYI (K.): Sophisticated multiconductor modelling in the frequency domain, Part 1: Numerical solution, Part 2: Case studies; *COST 261 Workshop*, Calgiari 2000.
- [II.1] CEI 61643-1 (2002-01), *Dispositifs de protection contre les surtensions connectés aux réseaux de distribution basse tension – Partie 1: Prescriptions de fonctionnement et méthodes d'essai*.
- [II.2] CEI 61643-12 (2002-02), *Parafoudres basse tension – Partie 12: Parafoudres connectés aux réseaux de distribution basse tension – Principes de choix et d'application*.
- [III.1] FAVEZ (B.), GOUQUL (J.C.): Contribution of studies on problems resulting from the proximity of overhead lines with underground metal pipe lines. *CIGRÉ 36.04*, 1970.
- [III.2] CDEGS software package of the Safe Engineering Services & Technologies Ltd., Montréal, Canada.
- [III.3] ITU-T Handbook, Directives, Volume II, *Calculating induced voltages and currents in practical cases*, Chapter 5, "Calculation of conductive coupling", ITU, Genève 1999.

SÉRIES DES RECOMMANDATIONS UIT-T

Série A	Organisation du travail de l'UIT-T
Série B	Moyens d'expression: définitions, symboles, classification
Série C	Statistiques générales des télécommunications
Série D	Principes généraux de tarification
Série E	Exploitation générale du réseau, service téléphonique, exploitation des services et facteurs humains
Série F	Services de télécommunication non téléphoniques
Série G	Systèmes et supports de transmission, systèmes et réseaux numériques
Série H	Systèmes audiovisuels et multimédias
Série I	Réseau numérique à intégration de services
Série J	Réseaux câblés et transmission des signaux radiophoniques, télévisuels et autres signaux multimédias
Série K	Protection contre les perturbations
Série L	Construction, installation et protection des câbles et autres éléments des installations extérieures
Série M	RGT et maintenance des réseaux: systèmes de transmission, circuits téléphoniques, télégraphie, télécopie et circuits loués internationaux
Série N	Maintenance: circuits internationaux de transmission radiophonique et télévisuelle
Série O	Spécifications des appareils de mesure
Série P	Qualité de transmission téléphonique, installations téléphoniques et réseaux locaux
Série Q	Commutation et signalisation
Série R	Transmission télégraphique
Série S	Equipements terminaux de télégraphie
Série T	Terminaux des services télématiques
Série U	Commutation télégraphique
Série V	Communications de données sur le réseau téléphonique
Série X	Réseaux de données et communication entre systèmes ouverts
Série Y	Infrastructure mondiale de l'information, protocole Internet et réseaux de nouvelle génération
Série Z	Langages et aspects généraux logiciels des systèmes de télécommunication