



This electronic version (PDF) was scanned by the International Telecommunication Union (ITU) Library & Archives Service from an original paper document in the ITU Library & Archives collections.

La présente version électronique (PDF) a été numérisée par le Service de la bibliothèque et des archives de l'Union internationale des télécommunications (UIT) à partir d'un document papier original des collections de ce service.

Esta versión electrónica (PDF) ha sido escaneada por el Servicio de Biblioteca y Archivos de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) a partir de un documento impreso original de las colecciones del Servicio de Biblioteca y Archivos de la UIT.

(ITU) للاتصالات الدولي الاتحاد في والمحفوظات المكتبة قسم أجراه الضوئي بالمسح تصوير نتاج (PDF) الإلكترونية النسخة هذه والمحفوظات المكتبة قسم في المتوفرة الوثائق ضمن أصلية ورقية وثيقة من نقلًا.

此电子版（PDF版本）由国际电信联盟（ITU）图书馆和档案室利用存于该处的纸质文件扫描提供。

Настоящий электронный вариант (PDF) был подготовлен в библиотечно-архивной службе Международного союза электросвязи путем сканирования исходного документа в бумажной форме из библиотечно-архивной службы МСЭ.

RECOMMANDATIONS

pour la protection des câbles souterrains contre l'action des courants vagabonds provenant des installations de traction électrique

Texte approuvé par la XVI^{me} Assemblée Plénière
du Comité Consultatif International Téléphonique C.C.I.F.
(Firenze 1951)

COMITÉ CONSULTATIF INTERNATIONAL TÉLÉPHONIQUE
(C.C.I.F.)

Modifications et Additions

à apporter aux:

Recommandations concernant la protection des câbles souterrains contre la corrosion (Paris, 1949).

Recommandations pour la protection des câbles souterrains contre l'action des courants vagabonds provenant des installations de traction électrique (Firenze, 1951).

INDEX ALPHABÉTIQUE DES OUVRAGES DU CCIF RELATIFS
A LA CORROSION

Publié par l'Union internationale des télécommunications
Genève, novembre 1955



PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

Avis n° 12 du Tome II du Livre Vert (p. 30)

Modifications aux « Recommandations pour la protection des câbles souterrains contre l'action des courants vagabonds provenant des installations de traction électrique » (Firenze, 1951)

LE COMITÉ CONSULTATIF INTERNATIONAL TÉLÉPHONIQUE,

Considérant

que, depuis l'établissement des « Recommandations pour la protection des câbles souterrains contre l'action des courants vagabonds provenant des installations de traction électrique » (Firenze, 1951), il résulte des renseignements nouvellement recueillis que diverses corrections doivent être apportées au texte actuel,

Emet, à l'unanimité, l'avis

qu'il convient d'apporter au texte actuel des « Recommandations pour la protection des câbles souterrains contre l'action des courants vagabonds provenant des installations de traction électrique » (Firenze, 1951) les modifications suivantes:

1. Paragraphe 1.6.2, alinéa 15, page 5: remplacer le texte actuel de cet alinéa par le texte suivant:

« Cette méthode de protection n'impose pas une limitation des courants vagabonds (émis par le réseau de traction) aussi sévère que la précédente; cependant, l'emploi de cette méthode ne dispense pas les Organismes exploitant des réseaux de traction de tenir compte des recommandations du chapitre II, relatives à la construction et à l'entretien de ces réseaux; l'application de cette méthode de protection est d'autre part facilitée par la mise en œuvre, à plus ou moins grande échelle, des dispositions relatives aux canalisations que comporte l'application de la première méthode. »

2. Paragraphe 2.1, alinéa 24, page 7: remplacer la phrase sous *b*) par la phrase suivante:

« *b*) faciliter le retour du courant par les rails en assurant une faible résistance électrique de la voie et en disposant judicieusement le système de retour afin notamment de régulariser, dans la mesure du possible, la répartition du potentiel le long du réseau des rails. »

3. Paragraphe 2.2.3, alinéa 28, page 7: remplacer le début de cet alinéa par le texte suivant:

« En particulier, quand ces voies ferrées sont établies sur traverses en bois, les traverses doivent être saines et, si elles sont imprégnées, elles ne doivent pas l'être d'un produit leur donnant une conductibilité électrique sensible. Le ballast doit être propre... »

4. Paragraphe 2.2.3, alinéa 29, page 7: remplacer le texte actuel de cet alinéa par le texte suivant:

« Si les voies sont établies sur traverses en béton armé, il est nécessaire d'interposer une plaque isolante entre le rail et la traverse; on doit veiller que le ballast soit suffisamment épais et soigné, pour qu'il assure le meilleur isolement possible de la voie par rapport au sol.

» En outre, les vis de fixation des rails aux traverses en béton armé doivent être très bien isolées.

» Les prescriptions de l'alinéa 28 ci-dessus concernant le ballast doivent être également appliquées aux voies posées sur des traverses en béton armé.

» Il est préférable de ne pas utiliser les traverses métalliques dans les lignes électrifiées en courant continu. Dans le cas où l'on ne peut pas éviter ces traverses, il faut veiller que le ballast soit suffisamment épais et soigné parce qu'il assure le meilleur isolement possible de la voie par rapport au sol, cette condition étant d'autant plus impérative que la voie sur traverses métalliques ne s'accommode pas normalement de l'emploi de plaques isolantes entre le rail et la traverse. »

5. Paragraphe 2.2.4, alinéa 35, page 8: supprimer cet alinéa.

6. Paragraphe 2.5, alinéa 63, page 11:

Pour tenir compte de certaines modalités d'application de la protection électrique, remplacer dans la dernière phrase « cette disposition est incompatible... » par « cette disposition peut être incompatible... »

7. Paragraphe 5.3.2.1, alinéa 158, page 22: ajouter après le texte actuel de cet alinéa la remarque suivante:

« *Remarque.* — L'attention est attirée sur le fait que certaines cellules redresseuses qui sont soumises à un courant presque toujours de même sens peuvent vieillir et devenir ainsi perméables aux courants de sens contraire; lors d'une inversion accidentelle du sens du courant, elles ne fonctionnent plus et ne jouent pas le rôle qu'on attendait d'elles. Il faut tenir compte de ce fait lorsqu'on se propose d'étudier un système de protection électrique avec cellules redresseuses. »

* * *

Avis n° 14 du Tome II du Livre Vert (p. 32)

*Modifications aux « Recommandations pour la protection contre la corrosion »
(Paris, 1949)*

LE COMITÉ CONSULTATIF INTERNATIONAL TÉLÉPHONIQUE,

Considérant

que, depuis l'établissement des « Recommandations concernant la protection des câbles souterrains contre la corrosion » (Paris, 1949), il résulte des renseignements nouvellement recueillis que l'alliage de plomb au calcium mentionné au chapitre IV des dites Recommandations n'a pas donné les résultats espérés;

que d'autre part quelques corrections doivent être apportées au texte actuel,
Emet, à l'unanimité, l'avis

qu'il convient d'apporter au texte des « Recommandations concernant la protection des câbles souterrains contre la corrosion » (Paris, 1949) les modifications suivantes:

1. *Alinéa 1*, 2^{me} ligne: supprimer les mots: « chimique ou ».

Remarque. — Lorsque l'on procédera à une nouvelle édition des Recommandations il conviendra de revoir soigneusement la terminologie et les définitions du

paragraphe 1.1.2. Il faudra ensuite employer partout la terminologie finalement adoptée.

2. *Alinéa 7*, pages 5 et 6, au bas de la page 5 et au haut de la page 6, supprimer les mots: « *et les chlorures* ».

3. *Alinéa 36*: ajouter à la suite de cet alinéa le texte suivant:

« Ce réactif se prépare en dissolvant 3 g de tétraméthyl-diamino-diphénylméthane dans une solution de 50 g d'acide acétique glacial et 50 g d'eau.

» Il s'emploie de la manière suivante: on met le réactif en contact avec les produits de corrosion du plomb en se plaçant, de préférence, de manière à pouvoir observer sur un fond blanc la coloration éventuelle due à la réaction; lorsque cela n'est pas possible, on met le réactif directement sur l'enveloppe du câble. En présence du peroxyde de plomb, on obtient une coloration bleue très intense. Si le peroxyde de plomb n'existe qu'à l'état de traces, un certain temps est nécessaire pour que la coloration se produise; dans ce cas, avant de se prononcer sur la présence ou sur l'absence de peroxyde de plomb, il convient d'attendre environ 5 minutes. La réaction est très sensible.

» Il convient toutefois d'attirer l'attention sur le fait que cette méthode n'est pas absolument sûre et que, lorsqu'elle ne donne pas de coloration, on ne peut pas en conclure qu'il n'y a pas corrosion électrolytique. »

4. *Alinéa 38*: modifier de la façon suivante les deux alinéas de la case de gauche du tableau:

1^{er} alinéa, 2^e phrase: au lieu de: « Dans des cas graves... », lire: « Dans certains cas ».

2^e alinéa: lire: « Le produit de la corrosion se présente *souvent*... »

5. *Alinéa 128*: supprimer l'alliage H de plomb à 0,04% de calcium.

6. *Alinéa 130*, 7^e et 8^e lignes, supprimer la phrase:

« La position de l'alliage H dans ce classement n'a pas été déterminée dans une série d'essais comparatifs. »

7. *Alinéa 134*, 6^e ligne, supprimer les mots: « et H ».

8. *Alinéa 142*, 1^{re} ligne, après le titre de l'alinéa, insérer le texte suivant:

« Grâce à la mise au point de procédés convenables de fabrication il est possible d'obtenir un produit ayant les propriétés suivantes: le polyéthylène... »

9. *Alinéa 143*: remplacer le texte actuel par le suivant:

« 4.3.3. Raccordement du polyéthylène. — La technique du raccordement des câbles à enveloppe de polyéthylène entre eux ou à des câbles à enveloppe de plomb n'est pas encore définitivement mise au point à l'heure actuelle. »

10. *Alinéa 256*: supprimer le paragraphe 2^o concernant l'application d'un lubrifiant constitué par une émulsion de silicate de sodium et de vaseline.

11. *Alinéa 273*, 5^e ligne, lire:

« soit à la ligne de rails (soutirage = drainage forcé), soit à une anode enterrée ou déversoir ».

12. *Alinéa 274*, dernière ligne, dans la parenthèse, au lieu de « élastique », lire: « classique ».

Index alphabétique des ouvrages du CCIF relatifs à la corrosion des enveloppes de câble :

On a utilisé dans cet index pour désigner les ouvrages du CCIF relatifs à la corrosion les abréviations suivantes :

- C** (Corrosion) = Recommandations concernant la protection des câbles souterrains contre la corrosion (Paris, 1949).
E (Electrolyse) = Recommandations pour la protection des câbles souterrains contre l'action des courants vagabonds provenant des installations de traction électrique (Firenze, 1951).
T II = Tome II du Livre Vert du CCIF (Genève, 1954).

		PAGES
<i>Alliages de plomb</i> (servant à la constitution des enveloppes)	C	20
<i>Anode réactive</i>	C	36, 37, 40
<i>Armures</i>		
— description	C	23
— continuité électrique (E al. 99)	E	15
<i>Artères de retour</i>	E	9
<i>Asphaltes</i> (utilisés pour les revêtements) — Spécification	C	27
<i>Bactéries</i>	C	13
<i>Barres collectrices</i>	E	9
<i>Bitumes</i> (utilisés pour les revêtements) — Spécification	C	27
<i>Ciment</i> (action corrosive)	C	33
<i>Cloisonnement</i>	E	15
<i>Corrosion</i>		
— chimique	C	5
	T II	31
— électrolytique	C	5, 6
	T II	29, 30
<i>Coup de feu</i> (C al. 15 et 16)	C	7, 8
<i>Courants telluriques</i> (C al. 304)	C	40
<i>Courants vagabonds :</i>		
Gêne apportée aux mesures d'isolement par les courants vagabonds	T II	95
Limitation des courants vagabonds	E	17
Origine des courants vagabonds	E	58
Protection contre les courants vagabonds	T II	29
Réduction des courants vagabonds	E	13
<i>Désagrégation intercrystalline</i> (C al. 297)	C	39
<i>Drain, drainage</i>		
— définition (E al. 136)	E	20
— description	E	22, 23, 61

	PAGES
<i>Electrodes impolarisables</i>	
— au calomel	E 39
— au chlorure de plomb	E 39
— au sulfate de cuivre	E 40
<i>Electrodes de mesure</i>	C 16, 17
<i>Enveloppe du câble</i>	
— constitution	C 20
— examen	C 9, 10
— isolement	E 14
<i>Folin-Denis (réactif de)</i>	C 29
<i>Goudrons de houille (utilisés pour les revêtements)</i>	C 26
<i>Joints isolants (E al. 101 et suivants)</i>	E 15
<i>Joints de rails (mesure de la résistance)</i>	E 51
<i>Matières plastiques (servant à la constitution des enveloppes des câbles)</i>	C 21
<i>Millon (réactif de)</i>	C 28
<i>Piles géologiques (C al. 303)</i>	C 40
<i>pH des sols et des eaux (définition et mesure)</i>	C 14, 15
<i>Phénol libre (C al. 156)</i>	C 24, 28
<i>Polarité des fils de contact</i>	E 10
<i>Prises de terre</i>	E 38
<i>Produits de corrosion (examen)</i>	C 9, 10
<i>Protection</i>	
— cathodique	E 23
— chimique	C 34
— électrique	C 35
	E 16, 20, 60
<i>Recommandations:</i>	
Recommandations concernant la protection des câbles souterrains contre la corrosion	T II 31, 32
Recommandations pour la protection des câbles souterrains contre l'action des courants vagabonds (électrolyse) provenant des installations de traction électrique	T II 29, 30
<i>Revêtements</i>	C 23
<i>rH des sols et des eaux (définition et mesure)</i>	C 17, 18
<i>Sols (terrains):</i>	
Classification	C 12, 13
pH des sols	C 14
rH des sols	C 17, 18
<i>Soutirage électrique</i>	E 23, 61
<i>Trillat (réactif de) (C al. 36)</i>	C 10
Additions au texte de C	T II 32

	PAGES
<i>Traction électrique :</i>	
Electrolyse due au retour des courants de traction électrique	T II 31
Réseaux de traction électrique	C 17
<i>Trolleybus</i>	E 11
<i>Tube cuirasse</i>	E 45
<i>Ventilation :</i>	
Ventilation des chambres de tirage	T II 104, 11
Ventilation des conduites, galeries et chambres de tirage . .	E 32
<i>Voie de roulement</i>	E 7

RECOMMANDATIONS

**pour la protection des câbles souterrains contre
l'action des courants vagabonds provenant des
installations de traction électrique**

Texte approuvé par la XVI^{me} Assemblée Plénière
du Comité Consultatif International Téléphonique C.C.I.F.
(Firenze 1951)

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

RECOMMANDATIONS POUR LA PROTECTION DES CABLES SOUTERRAINS CONTRE L'ACTION DES COURANTS VAGABONDS PROVENANT DES INSTALLATIONS DE TRACTION ÉLECTRIQUE

PRÉAMBULE

Les présentes recommandations ont été établies par le Comité Consultatif International Téléphonique en présence des Représentants de la Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques, de l'Union Internationale des Producteurs et Distributeurs d'Energie électrique, de l'Union Internationale des Chemins de fer, de l'Union Internationale de l'Industrie du Gaz et d'Associations nationales de tramways, pour faciliter l'examen des projets de coexistence de câbles souterrains de télécommunication et de lignes de traction électrique à courant continu, au point de vue des risques de corrosion électrolytique, et, le cas échéant, pour étudier les mesures à prendre sur les installations existantes en vue d'éviter cette corrosion, compte tenu de la présence des autres canalisations enterrées.

Toutes les questions d'ordre administratif ou économique, et notamment toutes les questions de réglementation et de législation relatives à ces problèmes, échappent à la compétence du Comité Consultatif International Téléphonique. On s'est donc abstenu d'entrer dans le détail des règles de procédure que devront suivre dans leurs rapports réciproques les Administrations et Exploitations privées téléphoniques d'une part, et les services de traction électrique et autres services intéressés d'autre part.

CHAPITRE I

INTRODUCTION

- 1 1. 1. — Les *Recommandations concernant la protection des câbles souterrains contre la corrosion*, publiées par le Comité Consultatif International Téléphonique, en 1949, contiennent des indications générales relatives aux différents genres de corrosion, à leur processus et à divers moyens susceptibles d'y remédier.
- 2 1. 2. — Les dangers de corrosion électrolytique des enveloppes métalliques des câbles souterrains proviennent en général des installations à courant continu : d'après l'expérience acquise jusqu'à ce jour, il semble que, sauf dans des cas spéciaux, les courants alternatifs ne produisent pas de tels effets lorsqu'ils sont seuls. Toutefois, la superposition, dans le sol, de courants alternatifs à du courant continu peut modifier les conditions de la corrosion électrolytique.
- 3 Les corrosions électrolytiques ne se manifestent en général qu'aux endroits où le courant sort des câbles pour pénétrer dans le sol.
- 4 Toutefois, ces considérations ne s'appliquent pas au cas des enveloppes en aluminium ou alliages d'aluminium qui sont attaquées sous l'action des courants des deux polarités et des courants alternatifs.
- 5 1. 3. — La protection des canalisations souterraines contre la corrosion électrolytique met en œuvre une grande variété de dispositions tendant, les unes, à réduire les courants vagabonds qui peuvent, non seulement causer des corrosions électrolytiques aux canalisations enterrées voisines, mais encore affecter le fonctionnement de certaines installations de téléphonie, de télégraphie ou de signalisation, les autres, à réduire l'importance de la corrosion que peuvent produire les courants vagabonds qui n'ont pu être éliminés.
- 6 1. 4. — Les dispositions ayant pour objet la réduction des courants vagabonds doivent être prises sur le réseau de traction électrique susceptible de les produire, et sont relatives à sa construction, son exploitation et son entretien. Elles font l'objet du Chapitre II.
- 7 1. 5. — La réduction de l'importance de la corrosion est obtenue tout d'abord par des dispositions d'application générale relatives à l'établissement des réseaux de câbles et autres canalisations souterraines, assurant une diminution de l'échange des courants entre le sol, d'une part, et ces câbles et canalisations d'autre part. Ce sont essentiellement des règles de bonne construction.
- 8 Ces dispositions doivent souvent être complétées par des mesures spéciales, dépendant des circonstances, destinées, soit à soustraire davantage les câbles à l'action des courants vagabonds, soit à réduire l'importance des dommages que ces courants peuvent produire. Certaines d'entre elles intéressent à la fois le réseau de traction et les réseaux de canalisations enterrées voisines.
- 9 Le principe de ces diverses dispositions est indiqué dans le Chapitre III.
- 10 1. 6. — Les conditions de mise en œuvre des diverses dispositions dont l'objet vient d'être indiqué, peuvent être déterminées à partir de deux principes différents.

- 11 1. 6. 1. — Une première méthode de protection (protection par limitation des courants vagabonds), consiste à considérer indépendamment l'un de l'autre, le réseau électrique susceptible de donner naissance aux courants vagabonds, et le réseau de canalisations qui peut être endommagé. Le réseau de traction est alors soumis à des règles établies en vue de réduire le plus possible, autant que le permettent la technique et l'économie, les courants vagabonds qu'il est capable d'échanger avec le sol.
- 12 D'autre part, les divers procédés permettant de diminuer les échanges de courant entre les canalisations enterrées et le sol et de réduire l'importance de la corrosion sont utilisés dans les limites compatibles avec la technique et l'économie.
- 13 Cette méthode, qui fait l'objet du chapitre IV, est celle dont l'utilisation est la plus ancienne. Elle a permis de remporter un certain nombre de succès. Cependant la détermination de règles entièrement rationnelles, dont l'application serait facile et économique dans la totalité des cas, n'a pu encore être dégagée. Vu le caractère forcément empirique des règles indiquées dans ce chapitre, celles-ci peuvent, suivant certaines circonstances, être inutilement trop rigoureuses ou au contraire laisser subsister encore des risques de corrosion électrolytique.
- 14 1. 6. 2. — Une seconde méthode de protection (protection électrique) dont la mise au point est plus récente consiste à empêcher l'action nocive des courants vagabonds sur les canalisations enterrées en transformant celles-ci en cathodes grâce à des dispositions établies compte tenu de l'état de l'ensemble de tous les réseaux en présence, susceptibles d'échanger des courants avec le sol, et notamment, du réseau de traction électrique.
- 15 Cette méthode de protection n'impose pas une limitation des courants vagabonds émis par le réseau de traction, aussi sévère que la précédente ; cependant son application est d'autant plus facile que ces courants sont plus réduits ; elle est également facilitée par la mise en œuvre, à plus ou moins grande échelle, des dispositions relatives aux canalisations, que comporte l'application de la première méthode.
- 16 Cependant, la protection électrique ne peut pas pratiquement s'appliquer à des enveloppes de câbles ou à des canalisations enterrées en aluminium ou alliages d'aluminium.
- 17 D'autre part, si, dans une région où l'on met en œuvre la protection électrique, il existe de telles enveloppes ou canalisations, il faut prendre des précautions spéciales pour assurer leur sauvegarde.
- 18 La protection électrique fait l'objet du chapitre V.
- 19 1. 7. — Quelle que soit la méthode adoptée, les mesures appliquées à un réseau de câbles ou de canalisations ne doivent pas être limitées à quelques dispositions prises seulement dans les régions où peuvent se manifester les corrosions. Elles doivent être étudiées en considérant toute l'étendue de ce réseau et en tenant compte des autres réseaux de canalisations ; elles doivent être adaptées à tout changement important apporté à la constitution ou aux conditions d'exploitation du réseau de traction.
- 20 De là résulte que l'efficacité de tout système de protection ne peut être garantie que moyennant une surveillance fréquente, sinon continue, des diverses installations intéressées, en vue de remédier dans le plus bref délai aux modifications même accidentelles qu'elles peuvent subir et qui entraîneraient un dérangement important dans le régime des courants vagabonds.
- 21 La nécessité de cette surveillance est particulièrement pressante dans le cas de la protection électrique.

22 1. 8. — L'expérience a montré qu'un réseau de câbles peut être pratiquement considéré comme étant à l'abri des corrosions par les courants vagabonds si, en aucune de ses parties, il ne s'approche à moins d'une certaine distance d'une voie de roulement parcourue par un courant continu de traction, ou de tout ouvrage, structure ou canalisation conductrice reliée métalliquement avec la voie de roulement et en contact avec le sol.

23 Cette distance minimum à observer pour demeurer pratiquement à l'abri du danger de corrosion sans dispositions spéciales est extrêmement variable ; elle dépend de la constitution du sol, de la conductance de la voie et du type de son infrastructure et des étendues respectives du réseau de traction et du réseau de câbles. Dans le cas d'un sol moyennement conducteur, cette distance est de l'ordre de quelques centaines de mètres.

CHAPITRE II

RÉDUCTION DES COURANTS VAGABONDS

2. 1. — GÉNÉRALITÉS

24 Pour diminuer les courants vagabonds provenant des réseaux de traction électrique par courant continu, on doit s'attacher à :

a) contrarier le passage des courants à la terre en assurant un isolement aussi bon que possible de l'installation de retour du courant de traction (rails, artères de retour et toutes structures métalliques qui leur sont raccordées d'une manière permanente) ;

b) faciliter le retour du courant par les rails en assurant une faible résistance électrique de la voie et en disposant judicieusement le système de retour.

2. 2. — VOIE DE ROULEMENT

25 2. 2. 1. — Les mesures concernant la voie de roulement sont d'une application générale quelle que soit la nature du réseau de traction électrique par courant continu (tramways ou chemins de fer). Elles doivent être appliquées, quelle que soit la méthode adoptée pour la protection des canalisations voisines.

26 2. 2. 2. — Les rails doivent être placés sur une infrastructure de faible conductibilité, disposée de manière à éviter la stagnation d'eau et, s'il est utile, bien asséchée par drainage hydraulique.

27 2. 2. 3. — Lorsqu'il s'agit de voies ferrées sur plateforme indépendante, cette condition est remplie quand la voie est établie et entretenue suivant les règles de l'art.

28 En particulier, si ces voies ferrées sont établies sur traverses en bois, les traverses doivent être saines, le ballast doit être propre et bien aéré. Il y a lieu d'éviter tout contact entre le rail et le ballast : celui-ci ne doit pas recouvrir les traverses, il doit être arasé au-dessous du patin du rail sans prendre contact avec lui.

29 Si elles sont établies sur traverses conductrices (traverses métalliques ou en béton armé), on doit veiller que le ballast soit suffisamment épais et soigné, pour qu'il assure le meilleur isolement possible de la voie par rapport au sol.

30 2. 2. 4. — Des dispositions spéciales doivent être prises en des points tels que les passages à niveau, pour éviter un contact direct des rails et des pièces conductrices qui leur sont reliées, avec le sol conducteur.

31 Quel que soit le type de pose des voies, il importe d'éviter, en principe, tout contact ou toute connexion métallique entre les rails et les pièces conductrices qui leur sont reliées d'une part, et, d'autre part, toutes les structures conductrices en contact avec le sol.

32 Il convient, en particulier, d'isoler électriquement les unes des autres les voies de sections de lignes non exploitées au moyen du courant continu, de celles des sections de lignes exploitées de cette manière.

- 33 Sur les ouvrages d'art métalliques ou en béton armé, il est très désirable d'assurer l'isolement de la voie par rapport à la structure métallique de ces ouvrages. En particulier, si la voie est établie sur plateforme indépendante, on doit, au passage sur des ponts métalliques non ballastés, poser les rails sur des matériaux non conducteurs, traverses ou longrines en bois, par exemple, et il faut prendre soin qu'aucune pièce de fixation (tirefond, boulon, bride, étrier, etc...) ne vienne toucher le pont en permanence, ou même par intermittence au moment du passage des trains. Il est recommandé de vérifier périodiquement, par exemple une fois par an, qu'il n'existe pas de contact entre les rails et l'ouvrage, cette vérification spéciale se faisant sans préjudice des visites d'entretien normal.
- 34 Des raisons de sécurité pour le personnel et les installations peuvent cependant conduire à établir une connexion peu résistante entre les rails et une structure métallique ; ce cas est susceptible de se présenter, notamment, sur les chemins de fer électrifiés, pour des ponts métalliques ou pour des pylônes, halles de gare, se trouvant à proximité immédiate des voies ou des lignes de contact. Il est alors recommandé d'étudier la possibilité d'établir la connexion à travers un dispositif n'assurant la continuité électrique qu'aux moments où la sécurité l'exige (intervalle de décharge ou dispositif équivalent). En outre, on doit alors s'efforcer d'isoler, autant que possible, par rapport à cette structure, toute canalisation extérieure enterrée.
- 35 Le recours à la protection électrique, lorsqu'il est possible, peut dispenser de l'emploi de ces précautions.
- 36 Les seules connexions métalliques admissibles entre les rails et les canalisations métalliques ou les câbles enterrés sont celles que comporte l'emploi de la protection électrique de ces canalisations ou câbles (voir le chapitre V).
- 37 2. 2. 5. — Il convient que l'aire de la section droite des rails soit appropriée à l'intensité des courants qui circulent dans ces rails.
- 38 Pour réduire la résistance électrique de la voie, il faut limiter le nombre des joints et maintenir à une valeur suffisamment faible la résistance électrique de chacun d'eux. A cet égard, la pratique de la soudure des rails entre eux et aux appareils de voie est très recommandée dans le cas des tramways et reste très avantageuse dans le cas des chemins de fer électrifiés.
- 39 Si les rails ne sont pas soudés, on doit utiliser en principe des connexions de rail à rail soudées, établies de sorte que la résistance du joint ne dépasse pas celle de deux mètres de rail ; toutefois, dans le cas de rails de longueur supérieure à 20 mètres, on peut admettre une résistance de joint ne dépassant pas celle d'une longueur de rail égale au dixième du plus petit des rails adjacents, mais en tout cas inférieure à celle de 5 mètres de rail.
- 40 L'emploi de connexions de rail à rail non soudées n'est pas recommandable ; celles qui seraient exceptionnellement utilisées devraient être particulièrement surveillées afin que leur résistance n'excède pas celle d'une longueur de rail égale à 5 mètres.
- 41 Sauf si des précautions particulières prises dans la construction assurent en permanence la bonne conductance de la voie aux points où se trouvent des branchements, aiguillages et croisements, il y a lieu d'assurer cette bonne conductance par des connexions réalisées au moyen de conducteurs spéciaux de section convenable (conducteurs transversaux placés entre toutes les files de rails de part et d'autre du branchement, de l'aiguillage ou du croisement, conducteurs longitudinaux shuntant les discontinuités électriques des files de rails).
- 42 En tous les endroits où les voies de roulement présentent des solutions de continuité électrique pour le passage du courant (ponts mobiles, éventuellement traversées de voies ferrées d'un autre réseau, etc...), la bonne conductance de la

voie doit être assurée par des conducteurs spéciaux, isolés du sol, reliés aux rails de part et d'autre de la section interrompue.

43 2. 2. 6. — Il est désirable que soit réalisée, autant que possible, l'égalité de répartition du courant entre toutes les files de rails d'une voie ou de voies parallèles. A cet effet, sauf si les besoins de la signalisation utilisée sur le réseau de traction s'y opposent, on établira des connexions transversales convenablement réparties et dimensionnées.

44 2. 2. 7. — Pour maintenir constamment la voie dans le meilleur état possible, au point de vue de sa conductance électrique, il est recommandable de vérifier périodiquement la résistance de tous les joints de rails et de les remettre en bon état dès que possible, si les résistances mesurées sont trop grandes.

45 Il convient de vérifier plus fréquemment les joints de branchements et de croisements parcourus habituellement par du courant, ainsi que les joints des sections de voie à fort trafic et ceux des voies proches des points de connexion des artères de retour aux rails.

46 Si la présence de signalisation par circuits de voie procure une vérification continue et très précise du bon état des voies, il n'est pas nécessaire de procéder à la vérification périodique des joints de rails.

2. 3. — ARTÈRES DE RETOUR ET BARRES COLLECTRICES

47 2. 3. 1. — Le système de retour du courant de traction doit être agencé de telle sorte qu'en cas d'interruption de la continuité électrique d'une artère de retour ou de son attache aux rails, ceux-ci restent raccordés métalliquement aux barres collectrices des sous-stations en service.

48 2. 3. 2. — Il est recommandable, pour éviter les risques de corrosion électrolytique, d'isoler de la terre, sur toute leur longueur, les artères de retour ainsi que les barres collectrices.

49 Cet isolement doit être vérifié périodiquement et, en tout cas, chaque fois qu'on peut redouter une modification accidentelle des conditions relatives aux artères de retour.

50 Si les rails sont reliés au pôle négatif des génératrices, il faut choisir, autant que possible, pour les points d'attache des artères de retour aux rails, des emplacements où le sol est sec, et éloignés des réseaux importants de canalisations et de câbles, car c'est au voisinage de ces points d'attache que le danger de corrosion électrolytique est le plus prononcé.

51 On doit veiller à maintenir en bon état les connexions entre les artères de retour et les rails. Dans le cas des tramways, il est recommandé de souder ces connexions.

52 Quant les artères de retour ne se trouvent pas sous une surveillance directe par suite de leur mode de pose, il est désirable que des dispositions soient prises pour permettre de vérifier leur bon état (par exemple, insertion en permanence à la sous-station d'un ampèremètre sur chaque artère de retour ; installation de sectionneurs au voisinage des rails pour permettre des mesures d'isolement...).

53 2. 3. 3. — Sauf s'il existe une protection électrique appliquée à l'enveloppe métallique d'une artère de retour, cette enveloppe ne doit comporter aucune connexion directe avec les rails, les barres collectrices ou une prise de terre quelconque.

54 2. 3. 4. — Il peut être dérogé à la recommandation relative à l'isolement des barres collectrices, s'il existe une protection électrique générale de l'ensemble des réseaux de câbles et canalisations enterrées dans la région considérée.

55 2. 3. 5. — Dans le cas de réseaux de traction électrique à configuration linéaire et dont les sous-stations sont échelonnées le long des voies de roulement, et plus spécialement dans le cas des chemins de fer électrifiés de grande communication, on est généralement amené, pour des raisons de sécurité, à établir une connexion entre les structures métalliques d'une sous-station et le circuit de retour du courant de traction.

56 Il y aurait alors intérêt que cette connexion soit faite au moyen d'un dispositif n'assurant la continuité qu'aux moments où la sécurité l'exige.

57 En outre, il est recommandé de relier ces structures métalliques aux rails plutôt qu'aux barres collectrices, à moins que les barres collectrices ne présentent qu'une différence de potentiel négligeable par rapport au rail.

2. 4. — LIMITATION DES DIFFÉRENCES DE POTENTIEL

58 2. 4. 1. — La pratique s'est établie d'apprécier l'importance des courants vagabonds échangés entre un réseau de traction et le sol, d'après les valeurs des différences de potentiel entre les points du réseau des rails ⁽¹⁾.

59 La répartition du potentiel le long des voies de roulement dépend notamment de la configuration de leur réseau, des conditions d'alimentation ⁽²⁾ et de trafic des lignes et enfin des caractéristiques du réseau des artères de retour du courant aux stations d'alimentation. En particulier, on peut régulariser cette distribution du potentiel en modifiant les points d'attache des artères, en réglant leur débit (par exemple au moyen de résistances additionnelles ou au moyen de survolteurs-dévolteurs à réglage automatique), en augmentant leur nombre et en répartissant la charge du réseau entre plusieurs stations d'alimentation.

60 2. 4. 2. — Dans le cas des chemins de fer électrifiés de grande communication et plus généralement des réseaux de traction électrique sur plate-forme indépendante à configuration linéaire et dont les sous-stations sont échelonnées le long des voies de roulement, il serait désirable que les variations du potentiel le long des voies soient limitées; toutefois, le plus souvent, on ne peut pas jouer sur les caractéristiques et les emplacements des sous-stations et des artères de retour; alors les variations de potentiel le long des voies ne peuvent être réduites qu'en maintenant aussi faible que possible la résistance électrique de la voie de roulement.

2. 5. — POLARITÉ DES FILS DE CONTACT

61 Il est quelquefois possible de diminuer le danger de corrosion en agissant sur la polarité de la ligne de contact. On peut aussi utiliser un système d'alimentation à trois conducteurs dans lequel certaines sections de la ligne de contact sont reliées au pôle positif, d'autres sont reliées au pôle négatif et les rails sont reliés au point neutre.

62 Quand le pôle positif est raccordé à la ligne de contact, le courant sort des enveloppes de câbles ou des canalisations, principalement au voisinage des points de raccordement des artères de retour, et, par conséquent, c'est là que réside le

⁽¹⁾ Des études sont en cours pour substituer à l'emploi de mesures de différences de potentiel à l'intérieur d'un réseau de traction, des mesures plus directes de la dispersion des courants hors des rails.

⁽²⁾ A égalité de puissance consommée, l'emploi de tensions d'alimentation plus élevées réduit l'importance des courants vagabonds.

plus grand risque de corrosion électrolytique. Quand le pôle négatif est raccordé à la ligne de contact, les points d'attaque maximum se déplacent avec le mouvement des automotrices et les zones d'attaque sont étalées et reportées vers les extrémités des zones d'alimentation.

- 63 On a eu parfois recours à l'inversion périodique de la polarité des fils de contact pour prolonger la durée probable des canalisations exposées à l'électrolyse, mais cela a soulevé certaines difficultés d'exploitation. En outre, cette disposition est incompatible avec l'emploi de la protection électrique.
- 64 L'étude de chaque cas particulier permettra de déterminer la possibilité et l'opportunité d'adopter une de ces dispositions au lieu de celle, généralement utilisée, qui consiste à relier le pôle positif à la ligne de contact.

2. 6. — TROLLEYBUS

- 65 En règle générale, en dehors des endroits où sont aménagées des mises à la terre locales et intentionnelles, toutes les parties de l'installation (fils de contact, voitures, artères) doivent être isolées du sol aussi parfaitement que possible. Il convient de maintenir avec soin le bon état de cet isolement.
- 66 Dans le cas des installations dont les fils de contact sont complètement isolés du sol, ou bien comportent seulement une mise à la terre unique pour l'ensemble du réseau de traction, la recommandation générale relative au maintien de l'isolement paraît suffisante.
- 67 Il en est de même dans le cas d'un réseau dont les fils de contact sont complètement isolés du sol et qui est sectionné en diverses parties, indépendantes l'une de l'autre, alimentées chacune par une sous-station ou un groupe de sous-stations, chaque partie ne comportant qu'une mise à la terre unique.
- 68 Les prises de terre établies dans les sous-stations, seulement pour des raisons de sécurité du personnel ou des installations, ne doivent pas être connectées aux fils de contact, sauf dans la ou les sous-stations où il y a une mise à la terre intentionnelle des fils de contact. Dans le cas d'un réseau entièrement isolé du sol, c'est-à-dire un réseau où aucun point de mise à la terre n'est relié en permanence à un fil de contact, la connexion temporaire entre un fil de contact et une prise de terre dans une sous-station peut être permise dans le but de faire une mesure d'isolement, mais une telle connexion ne doit être faite que pendant une durée aussi courte que possible afin de réduire les risques de passage du courant dans le sol en cas d'accidents tels que la rupture d'un conducteur ou le claquage d'un isolateur.
- 69 Dans le cas d'installations utilisant, pour le retour d'une partie des courants, une voie de roulement, exploitée ou non par des tramways, le réseau des rails et les artères de retour doivent satisfaire aux mêmes conditions que dans le cas d'une installation de tramways en service, compte tenu des conditions réelles de fonctionnement. En particulier, quand une ligne de trolleybus est installée pour prolonger une ligne de tramways en exploitation ou pour la remplacer, il est nécessaire de faire une étude des conditions d'alimentation et de retour des courants en fonction de la situation nouvelle. Les sections de voies inutiles pour le retour des courants doivent être déconnectées, par exemple en déposant les rails au moins sur quelques mètres.

2. 7. — MESURES PÉRIODIQUES DE CONTROLE

- 70 2. 7. 1. — Il est nécessaire de procéder à des mesures périodiques de contrôle sur les réseaux de traction en exploitation.
- 71 En particulier, on doit vérifier très régulièrement la conductance des voies de roulement et contrôler les intensités des courants dans les artères de retour.

72 2. 7. 2. — Il est recommandé d'effectuer des mesures de la valeur moyenne
des chutes de tension le long des voies.

73 Un écart trop important en plus ou en moins, par rapport aux mesures anté-
rieures ou par rapport aux résultats du calcul effectué conformément à l'annexe I
devra attirer l'attention. Une chute de tension trop faible peut être l'indice d'une
forte dérivation de courant dans le sol. Si la chute de tension est trop élevée, on
doit présumer que la conductance des joints est insuffisante.

74 2. 7. 3. — Dans le cas des réseaux maillés de traction, il est recommandé
d'effectuer les mesures de la valeur moyenne des différences de potentiel entre les
rails et les éléments voisins d'un réseau de canalisations souterraines.

75 Ces mesures sont particulièrement intéressantes là où les actions électrolytiques
sur les canalisations voisines sont le plus à redouter (voisinage des points d'attache
des artères de retour, nœuds importants de canalisations, etc...). Si les chutes de
tension dans le réseau maillé de canalisations sont faibles et si ces canalisations
ne comportent pas des joints isolants ou très résistants, on peut admettre que ce
réseau de canalisations est sensiblement équipotentiel. Si, de plus, il est suffisam-
ment étendu, on peut admettre que son potentiel est celui du point neutre du
réseau des rails. On peut alors comparer ces valeurs mesurées aux différences de
potentiel calculées entre rail et terre.

76 Ces mesures peuvent être faussées notamment par l'existence de couples
galvaniques car si les tensions sont peu élevées entre la voie et la terre, on peut
trouver entre l'élément de canalisation et la terre une différence de potentiel de
même ordre qu'entre la voie et cet élément de canalisation.

77 Malgré les réserves apportées à la valeur théorique du calcul des différences
de potentiel entre rail et terre, effectué conformément à l'annexe I, il est certain
qu'il donne une valeur approximative de ces différences de potentiel. Aussi
recherchera-t-on l'origine de toute anomalie entre les résultats du calcul et des
mesures. Ainsi, par exemple une différence de potentiel entre voie et réseau de
canalisations nettement trop faible attirera l'attention et l'on devra rechercher
si une connexion métallique fortuite n'existe pas entre le rail et le réseau de canali-
sations, ou bien si le soubassement n'est pas particulièrement conducteur. Une
différence de potentiel trop élevée entre voie et réseau de canalisations est générale-
ment l'indice d'une résistance exagérée de la voie ferrée et il conviendra d'améliorer
les joints de rails défectueux. En certains cas, des joints particulièrement mauvais
pourront entraîner une perturbation complète de la répartition des tensions entre
voie et réseau de canalisations.

78 2. 7. 4. — Les résultats de ces mesures périodiques seront régulièrement
comparés entre eux afin de mettre en évidence des anomalies accidentelles et d'y
remédier rapidement.

CHAPITRE III

RÉDUCTION DES EFFETS NUISIBLES DES COURANTS VAGABONDS

3. 1. — TRACÉ ET POSE DES CABLES

79 3. 1. 1. — Les câbles doivent être éloignés autant que possible des installations de traction électrique ; les endroits où les câbles traversent une voie ferrée ainsi que ceux où ils passent brusquement d'une grande à une petite distance de cette voie étant parmi les lieux où l'échange du courant avec le réseau des rails est le plus à craindre, il importe d'en réduire le nombre au minimum.

80 3. 1. 2. — En étudiant le tracé des câbles, on ne doit pas perdre de vue que le voisinage de cours d'eau et la nature ou l'état de certains sols (humidité importante, substances alcalines, sels et acides dissous) peuvent favoriser la corrosion électrolytique.

81 3. 1. 3. — Quand la protection contre la corrosion électrolytique doit être recherchée, il faut éviter, en principe, de poser directement dans le sol des câbles sous plomb ou alliage de plomb nus. Toutefois il n'est pas exclu que certains procédés de protection (protection électrique) permettent parfois de déroger à cette recommandation.

82 3. 1. 4. — On doit éviter tout contact métallique entre les enveloppes des câbles et les pièces ou structures conductrices reliées aux voies de traction, sauf s'il s'agit de connexions spécialement établies pour réaliser la protection électrique.

83 En particulier, lorsque des câbles sont portés par un pont ou une charpente métallique reliés électriquement avec une voie de traction, il est nécessaire de prévoir un isolement spécial par rapport à ces masses conductrices pour éviter tout échange de courant, soit dans les conditions normales, soit en cas de court-circuit de la ligne de traction.

84 A moins qu'elles ne constituent les éléments d'un système de protection électrique, les connexions des enveloppes des câbles de télécommunication à des prises de terre permanentes (autres que celles des centraux ou des stations de répéteurs) doivent être évitées.

3. 2. — CONDUITES, CANIVEAUX, GALERIES

85 3. 2. 1. — Dans la mesure où cela est économiquement possible, on doit établir les conduites des câbles, chambres de tirage... de manière à éviter que les enveloppes des câbles soient en contact avec des eaux d'infiltration ou des eaux stagnantes. Des indications relatives à ce sujet se trouvent dans les *Recommandations pour la protection des câbles souterrains contre la corrosion* (chapitre VI).

86 3. 2. 2. — On examinera dans chaque cas particulier, s'il est convenable de relier ensemble, au moyen de connexions métalliques soudées aux enveloppes, les divers câbles nus aboutissant dans les chambres de tirage ou de raccordement, aux points de branchement, etc..., ou si, au contraire, il est préférable de les laisser isolés les uns des autres.

87 Dans les cas où l'on est amené à poser des câbles faiblement isolés à l'intérieur de conduites métalliques (tuyaux, coquilles,...), une bonne continuité électrique de ces conduites doit être assurée, sauf au droit de joints isolants.

3. 3. — ISOLEMENT DES ENVELOPPES

88 3. 3. 1. — La protection complète d'un câble contre la corrosion électrolytique est assurée si, en réalisant sur toute la longueur du câble, un isolement électrique très élevé et durable de son enveloppe par rapport au sol, on supprime pratiquement l'échange de courant.

89 3. 3. 2. — Un certain degré de protection est obtenu quand on réduit l'importance totale des courants échangés entre le câble et le sol, sans porter en certains points à des valeurs dangereuses la densité des courants sortant du câble pour pénétrer dans le sol.

90 On peut atteindre ce résultat en réalisant un isolement de bonne qualité, portant sur des longueurs suffisantes, dans les régions où les échanges de courant avec le sol seraient les plus grands, notamment aux traversées des lignes de traction électrique par les câbles, aux passages sur des ponts métalliques, à proximité de structures conductrices en liaison plus ou moins directe avec les voies de traction, aux changements brusques de distance entre les câbles et les lignes de traction, au voisinage de stations d'alimentation de traction ou d'attaches d'artères de retour aux voies.

91 3. 3. 3. — Dans les zones où les courants vagabonds ont tendance à entrer dans le câble, un isolement, même léger, portant sur une longueur assez grande, peut parfois suffire : dans ces zones, un isolement de qualité quelconque portant sur des longueurs insuffisantes n'entraîne pas d'inconvénients.

92 Dans les zones où les courants vagabonds ont tendance à sortir du câble, un isolement de qualité même parfaite, s'il vient à présenter des défauts, entraîne une concentration du courant sortant aux points défectueux, ce qui peut provoquer une corrosion dangereuse. D'autre part, même en l'absence de défaut, un isolement parfait portant sur une trop petite longueur ne contribue pas à réduire sensiblement l'importance des courants sortants, mais déplace simplement leur point de sortie.

93 3. 3. 4. — L'isolement des câbles peut être assuré par un des moyens suivants :

1) Revêtements isolants.

2) Pose dans des conduites constituées au moyen de matériaux mauvais conducteurs (grès, fibro-ciment), ayant une épaisseur suffisante, construites de manière à être complètement imperméable et étanches.

3) Pose dans des caniveaux remplis de matière isolante.

4) Pose sur supports isolants (poules ou taquets de porcelaine, de verre...) dans des conduites, caniveaux ou galeries établis de sorte que les eaux et les matières terreuses ne puissent y pénétrer ou y séjourner.

94 Des indications relatives à la spécification des revêtements sont données dans les *Recommandations pour la protection des câbles souterrains contre la corrosion* (chapitre V, § 5. 2 et 5. 3). En particulier, ce document définit sous le nom de revêtements de la seconde catégorie, ceux qui assurent un isolement électrique très élevé et durable, au sens donné à ces termes dans le présent chapitre. Au contraire, les revêtements de la première catégorie doivent être considérés comme assurant seulement un isolement léger.

95 Bien que l'efficacité des revêtements de la seconde catégorie, ainsi que des systèmes de pose cités en 3) et 4) puisse être à peu près complète, même dans les situations difficiles, ces procédés ne peuvent, en raison de leur prix de revient élevé, être considérés comme d'emploi courant, surtout s'ils doivent être appliqués sur de grandes longueurs.

96 3. 3. 5. — On peut toujours employer simultanément les revêtements avec un des autres moyens énumérés plus haut, ou améliorer leur isolement par des enrobements ou enveloppements supplémentaires.

97 3. 3. 6. — La protection électrique est favorable au maintien de l'efficacité des revêtements.

3. 4. — CABLES ARMÉS

98 Une armure fabriquée conformément aux indications des *Recommandations pour la protection des câbles souterrains contre la corrosion* (Chapitre V, paragraphe 5. 4) protège contre les dommages mécaniques, pendant et après la pose, le revêtement isolant placé directement sur l'enveloppe des câbles et ainsi assure une certaine durée à ses qualités isolantes. Une protection souvent suffisante des enveloppes des câbles contre la corrosion électrolytique est obtenue par l'utilisation de câbles armés sur toute leur longueur.

99 Il est nécessaire d'assurer la continuité électrique de l'armure (sauf au droit des joints isolants). Il est aussi recommandable de relier métalliquement l'armure à l'enveloppe du câble en des points assez rapprochés (par exemple à tous les points d'épissure), et de prendre toutes dispositions évitant le contact du sol avec les sections de l'enveloppe qui sont dénudées. Quand ces conditions sont remplies, l'échange direct de courant avec le sol se fait non avec l'enveloppe mais avec l'armure. Celle-ci est susceptible d'être corrodée, mais cette corrosion, tant qu'elle demeure modérée, a peu d'inconvénients. S'il est utile, on peut d'ailleurs assurer la conservation de l'armure par la mise en œuvre des procédés de protection les mieux appropriés, indiqués dans les présentes Recommandations.

3. 5. — CLOISONNEMENT

100 3. 5. 1. — Le cloisonnement consiste à interrompre la continuité électrique du réseau des enveloppes de câbles ou des canalisations, au moyen de joints isolants, de manière à créer des sections indépendantes.

101 3. 5. 2. — Ces joints isolants doivent être réalisés de manière qu'ils présentent une résistance mécanique et une étanchéité suffisantes et durables.

102 Il convient d'éviter que leur insertion puisse provoquer une sortie de courant appréciable dans leur voisinage. A cet effet, il y a intérêt que l'isolement du câble par rapport au sol soit élevé sur les plus grandes longueurs possibles de part et d'autre du joint; il est aussi recommandable d'installer ces joints de préférence dans des endroits que l'on peut maintenir suffisamment secs.

103 Lorsque plusieurs câbles suivent le même parcours, le recours éventuel aux joints isolants doit se faire pour chacun d'eux aux mêmes endroits du parcours commun; en outre, il convient de relier métalliquement ces câbles entre eux avant et après les joints isolants.

104 Il est recommandable de contrôler périodiquement l'état électrique des joints isolants et de vérifier leur efficacité; à cet effet, il est utile de les installer de manière qu'ils soient facilement accessibles et de prendre, lors de leur mise en place, les dispositions utiles pour permettre d'effectuer les mesures convenables et pour pouvoir les mettre éventuellement en service ou hors service suivant les besoins.

- 105 3. 5. 3. — L'emploi d'un nombre réduit de joints isolants judicieusement placés peut être avantageux pour isoler des autres parties du réseau des câbles, certaines sections où l'échange de courant avec le réseau des rails est particulièrement à redouter : ce cas se présente spécialement aux endroits où les câbles traversent une voie ferrée ainsi qu'à ceux où ils passent brusquement d'une grande à une petite distance de cette voie.
- 106 3. 5. 4. — L'emploi de joints isolants judicieusement placés et en assez grand nombre (principalement dans les zones où le courant a tendance à entrer dans l'enveloppe des câbles), peut dans certains cas assurer une protection convenable contre la corrosion en limitant sur chacune des sections indépendantes l'importance des courants d'échange entre les enveloppes et le sol.
- 107 Toutefois il peut être nécessaire que l'enveloppe laisse circuler les courants alternatifs, par exemple afin de réduire les effets d'induction. On est alors amené à shunter les joints isolants par des condensateurs ou des dispositifs constitués par une bobine et un condensateur montés en série, dont l'inductance et la capacité ont été accordées à la résonance pour la fréquence industrielle la plus importante au point de vue des perturbations. Dans certains cas, on a eu recours à une deuxième enveloppe métallique continue intérieure, bien isolée de l'enveloppe métallique extérieure, celle-ci comportant un grand nombre de coupures régulièrement espacées.
- 108 3. 5. 5. — Dans les zones particulièrement exposées à la foudre, l'emploi des joints isolants est déconseillé, car il s'oppose à l'écoulement des courants de décharge atmosphérique, ce qui peut entraîner diverses détériorations graves des câbles.

3. 6. — PROTECTION ÉLECTRIQUE

- 109 Sous la désignation générale de « protection électrique », on comprend la mise en œuvre de différents moyens de protection contre la corrosion électrolytique qui sont tous basés sur le fait que les structures métalliques enterrées (fer, cuivre, plomb... mais non aluminium et ses alliages) sont immunisées contre les corrosions lorsqu'elles sont suffisamment électro-négatives par rapport au milieu ambiant.
- 110 Les diverses modalités d'application de la protection électrique sont indiquées dans le chapitre V.
- 111 Tandis que, dans certaines zones, l'existence de petits défauts du revêtement d'un câble ou d'une canalisation en présence de courants vagabonds peut être très nocive en raison de la concentration, en ces points, des courants de sortie, l'application d'une protection électrique supprime ce danger.
- 112 En outre, l'expérience montre que l'application de la protection électrique à une canalisation ou à un câble avec revêtement, dès sa pose, peut contribuer à la conservation de la qualité de l'isolement procuré par ce revêtement.
-

CHAPITRE IV

PROTECTION PAR LIMITATION DES COURANTS VAGABONDS

4. 1. — DISPOSITIONS CONCERNANT LES RÉSEAUX DE TRACTION

113 4. 1. 1. — Lors de l'étude d'un réseau de traction, afin de vérifier si les dispositions prises pour assurer le retour du courant sont satisfaisantes (notamment le nombre des artères de retour et l'emplacement de leurs points d'attache, la répartition de la charge entre elles...), il est recommandable de calculer les valeurs théoriques des différences de potentiel moyennes entre les rails et la terre, de la différence de potentiel moyenne la plus élevée entre points du réseau, et des chutes de tensions moyennes le long des rails, ces valeurs devant être comparées aux résultats de mesures correspondantes, comme il est indiqué aux paragraphes 2. 7. 2 et 2. 7. 3.

114 Le principe de la méthode de calcul est indiqué dans l'annexe I.

115 Dans les présentes Recommandations, on désigne par *différences de potentiel moyennes* ou *chutes de tension moyennes* les valeurs fournies par le calcul effectué pour les diverses sections de voie, en prenant pour la puissance, dans chaque section de voie, la moyenne relative à l'ensemble d'un grand nombre de jours ouvrables, chacun de ces jours comptant pour 24 heures, quelle que soit la durée effective du service dans la journée.

116 4. 1. 2. — Le choix de limites à assigner aux variations du potentiel dans le réseau de traction doit être guidé par les éléments d'appréciation suivants :

- a) situation et développement des réseaux métalliques souterrains ;
- b) nature de la voie ferrée et de son soubassement ;
- c) configuration générale du réseau de traction et conditions de son alimentation.

117 Des limites plus rigoureuses sont à adopter pour les zones où les réseaux de traction sont superposés à des réseaux métalliques souterrains (eau, gaz, câble d'énergie, câbles de télécommunication, etc...) ramifiés et relativement denses. Dans ce qui suit, de telles zones seront désignées sous le nom de *zones denses* et les autres zones sous le nom de *zones clairsemées*.

118 D'autre part, il y a lieu de faire une distinction entre les sections de voie constituées par des rails enterrés à fleur de sol, et celles qui, établies sur plateforme indépendante, sont ainsi mieux isolées de la terre.

119 Le nombre de voies dont dispose le courant pour rentrer aux sous-stations étant dans le cas des réseaux ou parties de réseaux à configuration linéaire, plus limité que dans le cas de réseaux maillés, il n'est pas possible d'adopter pour les premiers une limitation aussi rigoureuse que pour les seconds, même dans les zones denses.

120 4. 1. 3. — La détermination des différences de potentiel moyennes entre les rails et la terre permet d'acquérir une vue d'ensemble sur la situation du réseau de traction et de dégager quelles sont les zones où les risques de corrosion des canalisations voisines sont les plus grands.

121 On ne peut pas attribuer aux calculs correspondants une valeur trop absolue en raison de l'imprécision de la définition même du coefficient de passage qui inter-

vient dans les calculs et du fait que les valeurs relatives à donner aux coefficients de passage concernant les diverses sections de voie ne sont pas toujours bien connues. Mais, même si les valeurs de tensions ne sont calculées qu'approximativement, les variations correspondant à une modification d'un ou plusieurs des paramètres peuvent souvent être déterminées avec une précision suffisante. Par exemple, on peut de cette manière comparer différents modes d'équilibrage et de répartition des artères de retour, quand les autres paramètres (résistivité du sol, nature des rails, etc...), restent constants.

122 Enfin malgré les réserves apportées à la valeur théorique du calcul des différences de potentiel entre les rails et la terre, on doit reconnaître qu'en pratique de très bons résultats ont été obtenus dans certains pays où, par accord entre les exploitants des réseaux de traction et les administrations et organismes possédant des réseaux de canalisations et de câbles souterrains, on a appliqué le principe suivant : limitation des valeurs négatives obtenues par le calcul, des différences de potentiel entre les rails et la terre, dans les parties de la zone dense autres que celles où les rails sont bien isolés de la terre (plateformes indépendantes...) ¹.

123 4. 1. 4. — L'expérience a prouvé qu'une limitation des différences de potentiel calculées entre divers points du réseau de rails ne peut suffire, dans tous les cas, à assurer que les courants vagabonds provenant de ce réseau seront assez faibles pour ne pas causer de risques de corrosion électrolytique et peut au contraire, dans certaines circonstances, être inutilement trop rigoureuse : la nature du terrain, certaines particularités du mode de pose des voies jouent un rôle très important, mais ne peuvent être prises en considération lors d'un tel calcul. Toutefois, comme on ne dispose pas pour l'instant d'un criterium entièrement satisfaisant du bon agencement d'un réseau de traction au point de vue de la production de courants vagabonds, il semble convenable, à titre provisoire, d'indiquer des limites qui souvent se sont révélés raisonnables.

124 4. 1. 5. — *Dans un réseau de traction maillé*, la différence de potentiel moyenne entre un point quelconque du réseau, se trouvant dans la *zone dense*, et la sous-station la plus voisine, si les sous-stations fonctionnent en parallèle ou, dans l'autre cas, la sous-station d'alimentation correspondant à ce point ne devrait pas dépasser 2,5 volts.

125 *Dans un réseau de traction à configuration linéaire non établi sur une plateforme indépendante* répondant aux conditions des paragraphes 2. 2. 2 à 2. 2. 7, la différence de potentiel moyenne entre un point quelconque du réseau, se trouvant dans la *zone dense*, et la sous-station la plus voisine ne devrait pas dépasser 2,5 volts, si la distance en ligne droite entre ces deux points est inférieure à 1,66... km. Pour deux points dont la distance en ligne droite est supérieure, la valeur exprimée en volts de cette différence de potentiel ne devrait pas dépasser 1,5 fois la valeur de la distance exprimée en kilomètres.

126 *Dans un réseau de traction à configuration linéaire non établi sur une plateforme indépendante* répondant aux conditions des paragraphes 2. 2. 2 à 2. 2. 7, la différence de potentiel moyenne entre un point quelconque du réseau se trouvant dans la *zone clairsemée*, et la sous-station la plus voisine ne devrait pas dépasser 2,5 volts, si la distance en ligne droite entre ces deux points est inférieure à 1,25 km. Pour deux points dont la distance en ligne droite est supérieure, la valeur exprimée en volts de cette différence de potentiel ne devrait pas dépasser 2 fois la valeur de la distance exprimée en kilomètres.

127 *Dans le cas des réseaux de traction à configuration linéaire, établis sur une plateforme indépendante* répondant aux conditions des paragraphes 2. 2. 2 à 2. 2. 7,

(¹) Les règles suisses limitent ces valeurs négatives à 0,8 volt.

il n'y a pas lieu de fixer une limitation de la différence de potentiel (voir paragraphe 2. 4. 2).

- 128 4. 1. 6. — Si certains réseaux de traction ont été établis suivant des règles plus sévères que celles du paragraphe 4. 1. 5, et si l'application de ces règles s'est révélée satisfaisante tant au point de vue technique qu'au point de vue économique, pour tous les services intéressés, il n'y a pas lieu d'adopter les limites indiquées dans le paragraphe 4. 1. 5.
- 129 S'il est constaté au contraire qu'en raison des caractéristiques propres d'un réseau de traction existant, des valeurs très nettement supérieures aux limites indiquées dans le paragraphe 4. 1. 5 précédent peuvent être admises, sans qu'il en résulte des dommages pour les canalisations et câbles voisins, ces valeurs pourront être conservées, au lieu de ces limites.
- 130 4. 1. 7. — Les dispositions prises pour assurer le retour du courant de traction doivent être telles que la valeur du courant circulant dans les rails soit limitée, ce qui correspond à une limitation de la chute moyenne de tension.
- 131 4. 1. 8. — Enfin, lorsqu'on réalise l'équipotentialité des points d'attache des artères de retour, l'écart maximum des tensions à l'intérieur du réseau est le plus petit possible pour des conditions d'alimentation données et pour une position déterminée de ces points d'attache : cependant il n'importe de réaliser cette équipotentialité que si elle conduit à une amélioration de la situation au point de vue de l'importance ou de la répartition des courants vagabonds.

4. 2. — DISPOSITIONS CONCERNANT LES RÉSEAUX DE CÂBLES SOUTERRAINS

- 132 Même si un réseau de traction électrique satisfait aux différentes conditions énoncées dans les paragraphes précédents et est maintenu en bon état d'entretien, les canalisations et câbles souterrains placés dans le voisinage de ce réseau ne sont pas entièrement à l'abri de la corrosion électrolytique.
- 133 Pour se prémunir contre ces risques, il y a lieu de prendre en premier lieu les dispositions d'application indiquées dans le Chapitre III, en ce qui concerne le tracé et la pose des câbles, et éventuellement, l'établissement des conduites ou caniveaux, la constitution des revêtements ou de l'armure des câbles.
- 134 S'il y a lieu de redouter que ces dispositions ne soient pas suffisantes, notamment en certaines parties du réseau des câbles, on peut les compléter en appliquant dans les limites nécessaires et autant que l'économie le permet, certaines dispositions spéciales décrites également dans le chapitre III (paragraphes 3. 3. 4 et 3. 5).
-

CHAPITRE V

PROTECTION ÉLECTRIQUE

5. 1. — GÉNÉRALITÉS

135 5. 1. 1. — La protection électrique des enveloppes de câbles et des canalisations métalliques (fer, cuivre, plomb..., mais non aluminium et ses alliages) a pour but de les protéger contre la corrosion en les maintenant électro-négatives (ou cathodiques) par rapport au milieu électrolytique ambiant (sol, eaux...).

136 Pour obtenir ce résultat, il est nécessaire de créer dans le milieu ambiant un champ de courants continus de protection qui, entrant dans la canalisation ou l'enveloppe du câble en chacun des points où celle-ci est en contact avec ce milieu, circulent le long de celle-ci, puis sont collectés en certains points par des connexions métalliques (appelées connexions de drainage ou drains) et sont renvoyés dans ce milieu par l'intermédiaire d'anodes enterrées ou immergées, ou d'un réseau de rails jouant le rôle d'anode.

137 Suivant les cas, ces courants de protection sont produits par un générateur à courant continu, ou bien proviennent simplement des voies d'un réseau de traction électrique auxquelles les canalisations métalliques à protéger sont reliées en des points convenables au moyen de dispositifs appropriés.

138 5. 1. 2. — Ces courants de protection se superposent aux courants vagabonds préexistants.

139 Pour que la protection électrique soit efficace, il faut qu'à tout moment et en tout point de la canalisation ou de l'enveloppe du câble, la résultante des courants vagabonds et des courants de protection tende à entrer dans cette canalisation ou cette enveloppe, et que le potentiel résultant de celle-ci soit suffisamment électro-négatif par rapport à celui du milieu ambiant pour que le métal soit passif et que la corrosion soit impossible (voir Annexe IV, § A. 4. 1.).

140 5. 1. 3. — Ce résultat s'obtient au moyen de courants de protection dont l'intensité est d'autant plus faible que la conductance longitudinale des câbles ou canalisations à protéger est plus grande et que leur isolement moyen par rapport au milieu ambiant est meilleur.

141 5. 1. 4. — Si l'on peut se contenter de faibles courants de protection, le champ électrique résultant dans le milieu ambiant est moins important et il est plus facile d'éviter des répercussions fâcheuses pour les structures voisines des câbles ou canalisations qu'on veut protéger.

5. 2. — CONDITIONS GÉNÉRALES DE MISE EN ŒUVRE

142 5. 2. 1. — La mise en œuvre de la protection électrique nécessite l'examen d'ensemble de la situation topographique et électrique du réseau de traction et du réseau des câbles et canalisations à protéger en tenant compte, le cas échéant, de la présence de toutes les autres canalisations ou structures métalliques enterrées

de la région. Cette situation doit être révisée chaque fois qu'il se produit un changement important dans les conditions existantes. Des indications générales sur la manière de conduire cette étude préliminaire sont données dans l'annexe IV.

143 5. 2. 2. — Afin que les courants captés le long de leur parcours par les canalisations métalliques ou enveloppes de câbles à protéger puissent atteindre les connexions de drainage, il est nécessaire que ces canalisations ou enveloppes ne présentent aucune solution de continuité électrique, à moins qu'elles ne soient intentionnellement partagées en tronçons ayant chacun sa propre ou ses propres connexions de drainage.

144 A l'exception des points de séparation entre de tels tronçons, ou encore de certains points spéciaux où un accroissement intentionnel de résistance fait partie des dispositions adoptées pour la protection électrique (voir, par exemple, le paragraphe 5. 3. 3), on doit notamment supprimer ou court-circuiter les joints isolants ou trop résistants pour que la conductance longitudinale de la canalisation ou de l'enveloppe sur toute sa longueur soit la meilleure possible.

145 5. 2. 3. — Il y a lieu d'éviter toute liaison ou tout contact métallique direct entre la canalisation ou l'enveloppe à protéger et toute structure ou canalisation métallique extérieure, ne participant pas au système de protection.

146 Lorsqu'une canalisation protégée électriquement est fixée à un pont métallique, il faut, et surtout s'il s'agit d'une canalisation à faible résistance linéique, ou bien isoler soigneusement celle-ci du pont, ou bien séparer de l'ensemble de la canalisation, au moyen de joints résistants, le tronçon fixé au pont, en le shuntant par des conducteurs isolés ayant une section convenable.

147 Il en est de même si un tronçon de canalisation est posé sur des structures métalliques (pylônes, charpentes) non isolées du sol.

148 5. 2. 4. — Les connexions de drainage, et leurs attaches aux câbles ou canalisations à protéger, doivent être bien isolées du sol.

149 5. 2. 5. — Dans le cas de protection contre les courants vagabonds dus à un réseau de traction électrique, la mise en œuvre d'une protection électrique efficace n'est possible que si les voies de roulement et les artères de retour sont établies et maintenues en bon état, conformément aux conditions indiquées au chapitre II des présentes Recommandations.

150 Cette mise en œuvre est d'autant plus aisée que les différences de potentiel observables à l'intérieur du réseau des voies sont plus faibles. Toutefois, suivant les conditions de mise en œuvre de la protection électrique, on peut s'écarter des limites indiquées dans le chapitre IV relatif à la protection par limitation des courants vagabonds.

151 5. 2. 6. — Tout système de protection électrique impose une surveillance effective portant aussi bien sur ses conditions générales de fonctionnement que sur le bon état de l'appareillage mis en œuvre. Cette surveillance comporte notamment un contrôle fréquent des intensités des courants de protection et une vérification périodique des potentiels le long des canalisations ou câbles protégés. Afin de procéder aisément à ces opérations, il y a lieu de ménager, en certains points convenablement choisis, des prises de potentiel accessibles.

152 5. 2. 7. — Si en vue de protéger l'appareillage inséré dans les connexions de drainage, ou simplement, en vue d'empêcher qu'en cas d'incident sur le réseau de traction les canalisations ou enveloppes de câbles à protéger soient parcourues par un courant excessif, on installe sur les connexions un dispositif automatique de coupure (fusible, disjoncteur), il y a lieu de prévoir un système de signalisation immédiate de la mise hors service du drainage, présentant toute la sécurité désirable.

5. 3. — MODALITÉS D'EXÉCUTION DE LA PROTECTION ÉLECTRIQUE

153 La protection électrique est exécutée suivant les modalités suivantes qui peuvent être mises en œuvre isolément ou simultanément.

5. 3. 1. — *Drainage électrique direct.*

154 5. 3. 1. 1. — Le drainage électrique direct consiste à relier métalliquement, par des connexions de drainage, l'enveloppe du câble ou la canalisation à protéger, soit aux rails, soit aux artères de retour, soit aux barres négatives des réseaux de traction.

155 Le drainage électrique direct peut seulement se faire si l'on est assuré que, quelles que soient les conditions d'exploitation du réseau de traction, il ne se produira pas d'inversion du sens du courant (sinon des inversions très rares, de courte durée et avec une faible intensité de courant); il en résulte que son emploi n'est pas possible en toutes circonstances.

156 On effectuera de préférence la connexion de drainage à la barre négative de la sous-station productrice du courant de traction ou, à la rigueur, à un point pris sur une artère de retour. La connexion ne pourra se faire directement au rail que si on a pu s'assurer que celui-ci est toujours électronégatif par rapport au sol au point choisi.

157 5. 3. 1. 2. — En vue d'éviter une exagération inutile des tensions et courants mis en jeu, il convient parfois d'intercaler dans certaines connexions de drainage des résistances de valeur appropriée : on emploiera avantageusement des résistances dont la valeur croît quand le courant augmente.

5. 3. 2. — *Drainage électrique polarisé.*

158 5. 3. 2. 1. — Le drainage électrique polarisé consiste à intercaler dans les connexions de drainage un appareil assurant l'écoulement du courant dans un seul sens, bien déterminé (contacteur commandé par relais polarisé, redresseur...).

159 Cette disposition permet de choisir les points d'attache des connexions de drainage avec plus de liberté que dans le cas du drainage direct puisqu'il n'est plus nécessaire que ces points soient constamment électronégatifs par rapport au sol. L'action de telle ou telle connexion de drainage est supprimée durant les périodes où la connexion directe serait nuisible. Compte tenu de cette circonstance, l'étude complète qu'on doit entreprendre pour le choix judicieux des points d'attache et la détermination des caractéristiques de l'appareillage conduit généralement à la mise en œuvre simultanée de plusieurs dispositifs répartis le long de la canalisation ou du câble à protéger.

160 5. 3. 2. 2. — Les connexions qu'on peut être amené à installer entre des câbles ou des canalisations devant participer au même système de protection doivent comporter elles-mêmes un dispositif unidirectionnel, s'il est nécessaire que le courant qui les parcourt ait un sens déterminé.

5. 3. 3. — *Drainage électrique avec réglage aux potentiels négatifs minima.*

161 5. 3. 3. 1. — Ce système consiste, grâce à un nombre suffisant de connexions de drainage comportant des résistances appropriées et grâce à l'insertion, dans les canalisations ou enveloppes de câbles à protéger, de joints résistants (joints isolants shuntés par des résistances), à régler les courants circulant dans ces canalisations ou enveloppes de telle sorte que les potentiels de leurs différents tronçons s'écartent de ceux des points voisins du sol de la quantité juste suffisante pour obtenir la protection recherchée.

162 5. 3. 3. 2. — Les résistances disposées dans les connexions de drainage doivent être réglables, de manière que leur valeur puisse s'adapter assez étroitement aux variations des conditions du système.

163 5. 3. 3. 3. — La surveillance du fonctionnement du système doit être permanente.

5. 3. 4. — *Soutirage électrique (ou drainage forcé).*

164 5. 3. 4. 1. — Le soutirage électrique consiste à relier, par des connexions de drainage, l'enveloppe du câble ou la canalisation à protéger à la borne négative d'un générateur électrique de courant continu dont la borne positive est connectée au rail du réseau de traction.

165 Ce dispositif fonctionne même lorsque le potentiel du rail au point de connexion est initialement supérieur à celui de la canalisation.

166 Il permet d'utiliser l'excellente anode que constitue un réseau de rails bien entretenu; c'est en quelque sorte un dispositif intermédiaire entre le drainage électrique polarisé et la protection cathodique avec anode enterrée (voir paragraphe 5. 3. 5).

167 La force électromotrice du générateur est en parallèle avec celle qui résulte de la différence de potentiel, de sens et de valeur variables, existant entre les rails et la canalisation à protéger; le générateur doit donc à certains moments vaincre la sollicitation inverse due à cette différence de potentiel variable; sa caractéristique de fonctionnement (volts, ampères) doit par suite tenir compte des conditions locales.

168 Dans certains cas, la caractéristique à faible pente d'un appareil normal à cellules redresseuses suffit; dans d'autres cas une caractéristique spéciale s'impose (obtenue par exemple par l'insertion d'une bobine d'inductance en série avec les cellules redresseuses dans le secondaire du transformateur alimentant ces cellules).

169 5. 3. 4. 2. — Les courants alternatifs circulant dans les enveloppes de plomb de certains câbles étant susceptibles de détériorer les cellules redresseuses des appareils de soutirage, il peut être nécessaire de prévoir dans le circuit de soutirage un dispositif de protection (par exemple, bobine d'inductance en série...).

170 5. 3. 4. 3. — Eventuellement dans le cas où le courant de protection provient de redresseurs et comporte trop d'harmoniques, s'il peut en résulter des troubles téléphoniques pour les circuits des câbles protégés, il convient d'insérer un réseau filtrant approprié dans la connexion de drainage.

5. 3. 5. — *Protection cathodique avec anode enterrée.*

171 5. 3. 5. 1. — La protection cathodique avec anode enterrée consiste à relier, par des connexions métalliques, l'enveloppe du câble ou la canalisation à protéger à la borne négative d'un générateur de courant continu; la borne positive est connectée à une masse métallique enterrée servant d'anode (déversoir) par une connexion qui, ainsi que son attache à l'anode, doit être bien isolée du sol afin d'éviter une corrosion susceptible d'être très rapide et d'entraîner une rupture, à cause de la grande concentration de courant en cet endroit.

172 Il y a intérêt à éloigner suffisamment l'anode du câble ou de la canalisation à protéger de manière à augmenter sa zone d'action utile.

173 5. 3. 5. 2. — L'intensité du courant de protection dépend principalement de la force électromotrice du générateur et de la résistance du circuit, formé par le terrain, l'anode enterrée, la canalisation ou le câble intéressé et la connexion qui

les relie. La résistance de l'anode est presque toujours prépondérante, d'où l'intérêt d'établir cette anode avec soin, afin d'avoir une résistance aussi faible que possible (de l'ordre d'un ohm). Une prospection préalable du terrain (sondage électrique) permet souvent de déterminer un emplacement favorable à cet égard. Le sol, au droit d'une anode, peut être éventuellement amendé au moyen d'un mélange approprié (bentonite, gypse) enveloppant l'électrode.

174 Malgré ces précautions, il peut arriver qu'au bout d'un certain temps la résistance de l'anode, après avoir temporairement diminué, augmente progressivement, parce que les produits de son inévitable corrosion sont mauvais conducteurs et ne sont pas solubles. Il convient donc de surveiller périodiquement l'évolution de l'anode, afin de l'améliorer ou de la remplacer lorsque sa résistance est devenue trop élevée.

175 5. 3. 5. 3. — En outre, l'emplacement de chaque anode doit être choisi en dehors du voisinage de toutes autres structures métalliques enterrées susceptibles d'être mises en danger.

176 5. 3. 5. 4. — La recommandation faite dans le § 5. 3. 4. 3. s'applique encore dans le cas de la protection cathodique avec anode enterrée.

5. 4. — CONSERVATION DES STRUCTURES VOISINES

177 5. 4. 1. — Lorsque plusieurs canalisations métalliques ou enveloppes de câbles enterrés ont un long parallélisme dans une zone parcourue par les courants vagabonds dus à un réseau de traction, il y a généralement intérêt à étendre la protection électrique à toutes ces canalisations ou à toutes ces enveloppes de câble.

178 5. 4. 2. — Quand des câbles à haute tension et à basse tension et des câbles de télécommunication participent à un même système de protection, leurs enveloppes sont reliées électriquement entre elles.

179 Cette liaison est réalisée naturellement lorsque, dans une sous-station de traction électrique, toutes les terres sont interconnectées et reliées à la barre négative et qu'en outre, il existe à cet endroit une connexion de drainage entre cette barre et les câbles de télécommunication.

180 Lorsque des circonstances locales nécessitent l'interconnexion des enveloppes de câble en des points éloignés des sous-stations de traction il y a souvent intérêt, au point de vue de la protection cathodique, à déconnecter, dans certains postes à haute ou à basse tension, les enveloppes de câble, des différentes prises de terre, à condition de pouvoir prendre les dispositions convenables pour continuer à assurer la sécurité des câbles en cas d'incidents affectant les installations à haute ou à basse tension.

181 Dans ce dernier cas, les liaisons entre enveloppes de câble sont généralement réalisées à travers des résistances, inductances ou autres dispositifs appropriés ; il convient alors en outre de prendre toutes dispositions pour qu'en cas d'accident affectant les câbles à haute ou à basse tension, les courants susceptibles de circuler le long des enveloppes des câbles de télécommunication soient limités à une valeur telle qu'il n'en puisse résulter, pour les réseaux de télécommunication, aucune dégradation de matériel ni aucun trouble d'exploitation.

182 5. 4. 3. — Dans le cas d'un parallélisme plus court, ou d'un rapprochement, ou d'une traversée, il y a lieu d'étudier quelle est la plus avantageuse des solutions suivantes :

a) étendre la protection à toutes les canalisations ou enveloppes de câbles en présence, éventuellement en procédant à des cloisonnements convenables de telle ou telle canalisation ou enveloppe ;

b) aménager la protection de la ou des canalisations ou enveloppes de câbles protégées de sorte que, dans la zone de rapprochement, elle ne puisse entraîner aucun risque pour les canalisations ou enveloppes de câbles non protégées.

183 Par exemple lorsqu'une canalisation protégée électriquement traverse une route le long de laquelle sont enterrés de nombreux câbles non drainés, il peut être préférable, dans certains cas, plutôt que d'étendre la protection électrique à ces câbles en reliant leurs enveloppes à la canalisation protégée au moyen de connexions de protection, de recourir à une des dispositions suivantes :

— renforcer dans la zone de rapprochement l'isolement des canalisations ou enveloppes de câbles protégées ;

— séparer de l'ensemble de la canalisation ou de l'enveloppe du câble protégé électriquement, au moyen de joints résistants, le tronçon situé dans la zone de rapprochement, et shunter ce tronçon par des conducteurs isolés ayant une section appropriée.

184 En effet, quand, dans cette zone, il y a naturellement entrée des courants vagabonds dans les enveloppes des câbles, les seuls risques d'électrolyse de ces enveloppes, à cet emplacement, ne pourraient provenir que de courants de protection de la canalisation trop intenses. Si, pour éliminer ces risques, on connectait à la canalisation l'ensemble de ces enveloppes (lequel constituerait généralement une bonne mise à la terre locale), on relèverait inutilement le potentiel de la canalisation à protéger ; il en résulterait la nécessité de renforcer l'installation de protection et peut-être même, celle de créer de nouveaux points de drainage ou de soutirage.

ANNEXE I

PRINCIPE DU CALCUL

DE LA RÉPARTITION DES TENSIONS DANS LE RÉSEAU DES RAILS D'UNE INSTALLATION DE TRACTION

NOTION DE DIFFÉRENCE ENTRE LE POTENTIEL DU RAIL ET LE POTENTIEL CONVENTIONNEL DU SOL

- 185 Pour l'étude des dispositions à adopter afin de réduire l'intensité des courants vagabonds provenant des installations de traction, il est utile de connaître, au moins d'une manière approchée, la répartition des tensions dans le réseau des rails ; il peut être également utile de déterminer l'influence de la disposition des artères de retour sur cette répartition. Enfin, il est intéressant de déterminer, au moins grossièrement, les zones dans lesquelles le courant s'échappe des rails pour pénétrer dans le sol, et celles dans lesquelles le courant retourne aux rails.
- 186 En outre, dans certains pays, moyennant des hypothèses qui seront indiquées dans la suite, on définit une certaine valeur de potentiel, comme étant le potentiel conventionnel du sol et des canalisations enterrées, et on s'attache à limiter les différences entre les potentiels des rails et ce potentiel conventionnel.
- 187 L'objet de cette annexe est d'indiquer sur quelles hypothèses peuvent généralement se baser ces divers calculs et d'exposer le principe de la méthode qui permet de les effectuer.

A. 1. 1. — RÉPARTITION DES TENSIONS DANS LE RÉSEAU DES RAILS

- 188 Les effets de l'électrolyse dépendent non des valeurs instantanées des courants, mais de leur intégrale par rapport au temps, il est justifié de calculer soit les intégrales par rapport au temps des courants ou des tensions, soit — ce qui revient au même — les valeurs moyennes de ces grandeurs par rapport au temps.
- 189 Dans les *Recommandations* (chapitre IV, paragraphe 4. 1. 1), on a convenu de considérer comme valeurs moyennes, celles qui sont relatives à l'ensemble d'un grand nombre de jours ouvrables, chacun de ces jours comptant pour vingt-quatre heures, quelle que soit la durée effective du service dans la journée.
- 190 Les calculs s'effectuent en adoptant, pour simplifier, les hypothèses suivantes :
- 191 a) *Les pertes de courant le long des rails ou des artères de retour sont négligeables.* Cette hypothèse est d'autant mieux satisfaite que le réseau est mieux établi et entretenu : d'ailleurs, en l'adoptant, on obtient des valeurs approchées par excès des chutes de tensions le long de la ligne des rails.
- 192 b) *La valeur moyenne du courant amené aux rails par les automotrices, et rapportée à l'unité de longueur de voie, conserve une valeur uniforme en tout point d'une même section de voie.* (On appelle *section de voie* toute portion continue de voie sur laquelle ne se trouve aucun croisement, aucun branchement ou aucune attache d'artère de retour).
- 193 Cette valeur peut, lorsqu'il s'agit d'une voie exploitée, se déduire des indications des compteurs installés dans les voitures. S'il s'agit d'une voie en projet, elle peut se tirer de relations empiriques donnant la consommation spécifique des machines en fonction du poids transporté, de la vitesse de marche, de la pente de la ligne, etc...
- 194 Les autres données du problème sont alors la configuration générale du réseau des rails et des artères de retour, et la valeur des résistances de ces divers éléments du réseau.

195 Le calcul peut être conduit de la manière suivante :

196 1. On connaît en chaque point du réseau de rails la densité linéique moyenne
du courant d'alimentation entrant. On peut donc déterminer la valeur I de l'inten-
sité totale du courant entrant dans le réseau entier.

197 Les courants entrant dans le réseau de rails ne peuvent en sortir que par les
artères de retour : la somme des courants sortant par ces artères de retour est donc
égale à I .

198 2. Lorsqu'il existe une seule artère de retour F_1 de position bien déterminée,
si l'on connaît en chaque point de la voie la valeur de la densité du courant entrant,
et d'autre part la valeur I_{F_1} du courant sortant par l'artère de retour (valeur égale
à I dans ce cas particulier), on peut déterminer, par application des lois de Kirchhoff
et d'Ohm, d'une part la valeur de l'intensité passant en chaque point de la voie,
d'autre part la valeur des chutes de tension tout le long des rails.

199 Cette détermination peut s'effectuer soit par résolution numérique ou gra-
phique d'équations, soit par mesures électriques sur un réseau factice.

Mi étant un point quelconque du réseau des rails, on désignera par :

I_M la valeur moyenne du courant passant en ce point M ,

V_M la valeur de la tension moyenne entre le rail en ce point et un point de
référence arbitrairement choisi dans le réseau.

(Les seconds indices i rappellent que I_M et V_M ont été calculés en admettant
que tout le courant I a été évacué par l'artère F_1).

200 3. Soit maintenant le cas d'un réseau comportant p artères de retour $F_1, F_2,$
 \dots, F_p dont les positions sont bien déterminées.

On peut répéter les calculs précédents pour chaque artère, en supposant qu'elle
existe seule.

Soient alors :

$I_{M1}, I_{M2}, \dots, I_{Mi}, \dots, I_{Mp}$ les différentes valeurs du courant qui passerait en
un même point M du réseau des rails ;

$V_{M1}, V_{M2}, \dots, V_{Mi}, \dots, V_{Mp}$ les différentes valeurs de la tension entre un
même point M et un point de référence arbitraire, mais le même dans tous les cas,
calculées chacune dans l'hypothèse de l'existence d'une seule artère de retour.

201 Il est important de noter que ces quantités peuvent être calculées une fois
pour toutes, à partir des valeurs du courant entrant, et des positions des artères,
indépendamment de toute caractéristique électrique des artères.

202 Soient enfin $I_{F1}, I_{F2}, \dots, I_{Fi}, \dots, I_{Fp}$ les valeurs des courants sortant respec-
tivement par les artères $F_1, F_2, \dots, F_i, \dots, F_p$.

203 On a nécessairement :

$$(1) \quad \sum_{i=1}^{i=p} I_{Fi} = I$$

204 D'autre part, la valeur du courant au point M sera égale à :

$$(2) \quad I_M = \frac{\sum_{i=1}^{i=p} I_{Fi} I_{Mi}}{\sum_{i=1}^{i=p} I_{Fi}}$$

205 La valeur de la tension au point M sera, de même :

$$(3) \quad V_M = \frac{\sum_{i=1}^{i=p} I_{Fi} V_{Mi}}{\sum_{i=1}^{i=p} I_{Fi}}$$

206 Ainsi, dans les hypothèses faites jusqu'ici, la connaissance de la valeur de l'intensité des courants sortant par chaque artère permettrait de déterminer complètement la distribution des courants dans le réseau des rails, ainsi que la répartition des tensions.

207 4. Pour l'application de ces formules, on peut être amené à partir de données différentes suivant l'objet de l'étude à faire.

208 4. 1. — On peut par exemple s'imposer à priori la valeur du courant qui devrait sortir des rails par chaque artère de retour. Pour pouvoir effectivement obtenir ce résultat, il faut déterminer les caractéristiques électriques des artères, de telle manière qu'elles satisfassent à certaines conditions.

209 Soient $R_1, R_2, \dots, R_i, \dots, R_k, \dots, R_p$ les résistances électriques à donner à chacune de ces artères.

$V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_k, \dots, V_p$ les valeurs des tensions entre les points 1, 2, $\dots, i, \dots, k, \dots, p$, où ces artères sont raccordées aux rails, et le point de référence.

210 D'après l'équation générale (3), l'expression de ces valeurs est :

$$(4) \quad \left[\begin{array}{l} V_1 = \frac{\sum_{i=1}^{i=p} I_{Fi} V_{1i}}{\sum_{i=1}^{i=p} I_{Fi}} \\ \\ V_k = \frac{\sum_{i=1}^{i=p} I_{Fi} V_{ki}}{\sum_{i=1}^{i=p} I_{Fi}} \end{array} \right.$$

211 Comme toutes les artères de retour sont reliées à la même barre à la station génératrice, on doit avoir :

$$(5) \quad V_1 - R_1 I_{F1} = \dots = V_k - R_k I_{Fk} = \dots = V_p - R_p I_{Fp}.$$

212 L'ensemble des p équations (4) et des $(p - 1)$ équations (5) ne saurait suffire à la détermination des $2p$ inconnues (valeurs de V_k et valeurs de R_k). On peut donc, par exemple, fixer arbitrairement la valeur d'une de ces inconnues.

213 Il faut noter qu'il est cependant nécessaire, pour que la solution analytique ait un sens physique, que les valeurs trouvées pour les différentes résistances soient positives.

214 4. 2. — On peut se proposer de déterminer la distribution des courants de retour entre les différentes artères de telle sorte que les points où toutes les artères se raccordent aux rails soient tous au même potentiel.

215 Le système des équations à résoudre comprend alors :

la relation (1),

les p équations (4),

auxquelles il faut ajouter les $(p-1)$ équations (6) :

$$(6) \quad V_1 = V_2 = \dots = V_k = \dots = V_p$$

soit au total $2p$ équations pour calculer $2p$ inconnues (valeurs des I_{Fk} et des V_k). La solution de ce problème est donc complètement déterminée.

216 4. 3. — On peut se proposer de rechercher quelle est la distribution des courants dans un réseau de rails, lorsque les artères de retour ont une résistance définie à l'avance.

217 Soient encore V_k la valeur de la tension entre le point d'attache de l'artère F_k et le point de référence, R_k la résistance de cette artère.

218 Le système des équations à résoudre comprend alors :

la relation (1),

les p équations (4),

les $(p-1)$ équations (5),

soit $2p$ équations pour calculer $2p$ inconnues (valeurs de I_{Fk} et de V_k). La solution du problème est encore déterminée.

219 5. Quoi qu'il en soit, lorsque sont déterminées les valeurs de l'intensité des courants sortant par chaque artère, on peut, au moyen des équations (3), calculer la répartition des potentiels le long des rails, le potentiel de référence étant celui d'un point arbitrairement choisi au début. Cela permet de s'assurer que les chutes de tension moyennes par mètre, et les différences de tension moyennes entre deux points quelconques du réseau, n'excèdent pas des valeurs limites.

A. 1. 2. — NOTION DE DIFFÉRENCE ENTRE LE POTENTIEL DU RAIL ET LE POTENTIEL CONVENTIONNEL DU SOL

220 On peut déterminer grosso modo les zones dans lesquelles le courant s'échappe des rails pour entrer dans le sol, et celles dans lesquelles le courant rentre dans les rails, à partir de l'hypothèse suivante :

221 Soit i_M la densité, en un point M quelconque des rails, du courant qui sort des rails pour entrer dans le sol (si au point considéré, il y a rentrée du courant dans les rails, i_M est négatif),

V_M la valeur précédemment calculée de la tension entre le point M et un point de référence arbitraire,

V_0 la valeur de la tension entre un point du sol infiniment éloigné de l'installation de traction, et le même point de référence.

222 On admet qu'il est possible d'écrire en chaque point :

$$(7) \quad i_M = C_M (V_M - V_0),$$

C_M étant un coefficient de la nature d'une conductance appelé *coefficient de passage* au point M, et dépendant principalement en chaque endroit de la nature des rails, de leur mode de pose, et des propriétés électriques du milieu conducteur avoisinant (fondations et terrain).

223 Moyennant cette hypothèse, et en supposant connues les valeurs des C_M tout le long des voies, on peut calculer V_0 lorsqu'il s'agit d'un réseau de traction dont les artères sont parfaitement isolées du sol, notamment aux usines génératrices.

224 Dans ce cas, en effet, la somme des courants sortant des rails vers le sol est égale à celle des courants qui rentrent dans les rails. Autrement dit, la somme algébrique de tous les courants d'échange entre les rails et le sol est nulle.

225 Ainsi :

$$(8) \quad \int C_M (V_M - V_0) dl = 0,$$

l'intégrale étant étendue à toute la longueur des rails ; on tire de là

$$(9) \quad V_0 = \frac{\int C_M V_M dl}{\int C_M dl}$$

La connaissance de V_0 permet alors par application de la relation (7) de déterminer les zones d'entrée ou de sortie du courant.

226 Il convient de noter que, pour appliquer la formule (9), il n'est pas nécessaire de connaître la valeur absolue des C_M mais qu'il suffit de connaître leurs rapports à l'une d'entre elles. En particulier, si pour tous les points du réseau, C_M était constant, la relation (9) deviendrait

$$(9 \text{ bis}) \quad V_0 = \frac{\int V_M dl}{\int dl}$$

227 L'expérience semble montrer que cette hypothèse de calcul conduit à des résultats suffisamment approchés pour l'objet de l'étude, lorsqu'il s'agit d'un réseau comportant des rails d'un type uniforme posés partout de la même manière, et lorsque l'infrastructure de la voie ne présente en aucun endroit d'anomalies de conductivité.

228 En outre, il a été établi par l'expérience de certains pays que, si l'infrastructure de la voie ne présente en aucun endroit d'anomalies de conductivité, le calcul conduit à des résultats suffisamment approchés pour l'objet de l'étude, lorsqu'on adopte pour des sections de voie dans lesquelles il est fait usage du même type de rails et du même mode de pose, des valeurs relatives uniformes des coefficients de passage.

229 Voici, par exemple, quelques-unes de ces valeurs relatives :

$C = 1$, pour une double voie avec rails à gorge ;

$C = 0,7$ pour une simple voie avec rails à gorge ;

$C = 0,1$ pour une simple voie avec rails Vignole.

230 Grâce à cette circonstance, on peut donner de la formule (8) une expression plus développée.

231 Etant donné une section de voie, ou plus précisément la partie d'une section de voie pour laquelle on peut attribuer à C une valeur uniforme, soient :

A et B les extrémités de cette partie de la section,

L la longueur de cette partie,

J la valeur moyenne de l'intensité totale du courant d'alimentation entrant dans cette partie,

V_A et V_B les tensions entre les points A et B et le point de référence dont il a été question jusqu'ici.

232 Pour cette partie de la section, on doit former l'intégrale :

$$\int_A^B V_M dl$$

où l est la distance séparant le point M du point A.

233 On a, en vertu de la loi d'Ohm :

$$V_M = V_A + r \int_A^M (I_A + J \frac{l}{L}) dl ,$$

r représentant la résistance de la voie, par unité de longueur,

I_A l'intensité du courant traversant la voie au point A, compté positivement dans le sens de B vers A.

On a donc :

$$V_M = V_A + r l I_A + r \frac{J l^2}{L 2}$$

En particulier,

$$V_B = V_A + r L I_A + r \frac{J L^2}{L 2}$$

Dès lors :

$$\int_A^B V_M dl = L (V_A + r I_A \frac{L}{2} + r \frac{J L^2}{L 6}) = \frac{L}{2} (V_A + V_B) - \frac{L^2}{12} r J$$

234 En général, même pour une section un peu longue, le terme du second degré en L est négligeable. Il reste alors :

$$\int_A^B V_M dl = \frac{L}{2} (V_A + V_B)$$

Et l'expression de V_0 peut s'écrire :

$$V_0 = \frac{\sum CL (V_A + V_B)}{2 \sum CL}$$

la sommation étant étendue à tout le réseau de traction.

V_0 est le potentiel conventionnel de l'ensemble du sol et des canalisations enterrées (mentionné ci-dessus) par rapport au point choisi arbitrairement comme référence.

235 Il convient de remarquer que si l'imparfaite connaissance des valeurs de C peut conduire à une estimation erronée de V_0 , l'erreur qui en résultera sera de mal situer les points neutres où aucun courant ne s'échappe entre les rails et le sol ; cependant, les parties des zones où l'échange est important, seront généralement bien situées.

ANNEXE II

MESURES ÉLECTRIQUES

A. 2. 1. — INTRODUCTION

236 A. 2. 1. 1. — L'exécution de mesures électriques peut avoir pour objet de recueillir les données nécessaires pour l'étude de divers problèmes concernant la protection des câbles ou autres canalisations métalliques enterrées contre la corrosion électrolytique due aux courants vagabonds provenant des installations de traction électrique à courant continu.

237 Parmi ces divers problèmes, de complexité très variée, on peut citer, à titre d'exemple :

— Recherche de la nature d'une corrosion et, éventuellement, de l'origine des courants vagabonds qui l'ont causée.

— Détermination de l'importance des courants vagabonds émis ou recueillis le long d'une section plus ou moins longue de voie ferrée électrifiée, ou de câble souterrain.

— Etude de la situation générale d'un réseau de traction au point de vue des courants vagabonds qu'il produit.

— Etude de la situation générale de réseaux de canalisations ou de câbles souterrains se trouvant dans le champ de courants vagabonds.

— Choix des caractéristiques d'un système de protection électrique.

238 D'autre part, des mesures électriques peuvent avoir simplement pour objet de s'assurer que certaines conditions de coexistence d'un réseau de traction et d'un réseau de câbles sont satisfaites et notamment que certaines parties des installations demeurent en bon état.

239 A. 2. 1. 2. — Les grandeurs électriques à considérer en premier lieu sont d'une part les intensités et les densités de courant, d'autre part les différences

de potentiel. Comme il sera indiqué au moment de leur description, les mesures directes des intensités et densités sont souvent difficiles ou délicates. On leur préfère donc souvent des déterminations indirectes faites à partir de mesures de différences de potentiel, exécutées en prenant les précautions nécessaires.

240 Les mesures de différences de potentiel sont également celles auxquelles on a le plus souvent recours soit pour des essais préliminaires, soit pour le contrôle d'une situation générale, surtout si aucune disposition spéciale n'a été prise antérieurement pour installer facilement des ampèremètres.

241 La vérification du bon état des joints des rails se fait par des mesures de détermination ou de comparaison de résistances.

242 A. 2. 1. 3. — Le plus fréquemment, l'interprétation des résultats de mesures repose sur la comparaison des valeurs de deux ou plusieurs grandeurs différentes (courants, densités de courant, différences de potentiel) lesquelles dépendent, suivant des lois plus ou moins complexes, de la répartition des courants dans les voies du réseau de traction. Or cette répartition varie d'une manière permanente en fonction notamment de l'importance du trafic et du mouvement des voitures. De là résulte que des précautions spéciales doivent être prises pour obtenir des données susceptibles d'être rattachées les unes aux autres. La comparaison de valeurs instantanées n'est possible que si elles sont obtenues au moyen de mesures simultanées. On doit souvent envisager des valeurs moyennes résultant de relevés effectués pendant des durées suffisamment longues. Ces considérations interviennent dans le choix des méthodes les mieux appropriées et de l'appareillage le plus convenable.

A. 2. 2. — APPAREILLAGE D'EMPLOI GÉNÉRAL

243 A l'exception de certaines méthodes reposant sur l'emploi d'appareils ou de montages spéciaux qui seront décrits à propos de leur mise en œuvre, la plupart des mesures sont faites en utilisant des instruments ou des accessoires ayant des caractéristiques communes qui vont être indiquées dans le présent titre.

A. 2. 2. 1. — Ampèremètres.

244 Les ampèremètres sont généralement utilisés pour la mesure du courant circulant le long d'une canalisation métallique, d'un rail ou d'une connexion métallique d'amenée ou d'échange de courant.

245 Il est essentiel que la résistance d'un ampèremètre avec son shunt, y compris la résistance des connexions entre le shunt et le conducteur parcouru par le courant à mesurer, soit extrêmement faible, de sorte que l'insertion de l'appareil ne tende pas à modifier la valeur de ce courant. En règle générale cette résistance ne devrait pas dépasser 0,01 ohm.

246 Les ampèremètres doivent être des appareils mesurant exclusivement le courant continu, avoir la sensibilité convenable, être à indications rapides et de préférence, avoir un zéro médian, à moins qu'on ne soit assuré que le sens du courant à mesurer est invariable.

A. 2. 2. 2. — Voltmètres et galvanomètres indicateurs.

247 Les voltmètres sont généralement utilisés pour la mesure de différences de potentiel :

a) entre deux points, relativement éloignés (depuis quelques mètres jusqu'à plusieurs kilomètres) d'un même conducteur, ou de conducteurs d'un même réseau, métalliquement reliés entre eux ;

b) entre conducteurs (ou entre conducteur et électrode métallique) enterrés ou en bon contact avec le sol, non reliés métalliquement entre eux ;

c) entre une électrode impolarisable et un conducteur enterré ou en contact avec le sol ;

d) entre deux points très rapprochés (par exemple, quelques décimètres) d'un même conducteur, en vue de déterminer le courant qui le parcourt,

e) entre deux points d'un montage qui par réglage doivent être rendus équipotentiels (utilisation comme appareil de zéro).

248 Ces instruments doivent être des appareils fonctionnant exclusivement en courant continu et à indications rapides : il y a généralement intérêt qu'ils soient à zéro médian. Leur résistance et leur sensibilité doivent être choisies en fonction des conditions d'emploi. En particulier, à égalité de tensions à mesurer, la résistance nécessaire pour exécuter les mesures b) est de beaucoup supérieure à celle qui pourrait suffire pour l'exécution des mesures a) et par exemple de l'ordre de 10000 ohms par volt de la tension maximum mesurable. Dans le cas des mesures c), la résistance de l'appareil doit être encore beaucoup plus élevée : on a généralement recours à un appareil du type électronique.

249 Dans le cas des mesures d) et e) où il peut être utile de déceler des fractions de millivolt et parfois même de microvolt, la résistance de l'instrument (en ohms par volt de la tension maximum mesurable) peut être beaucoup plus faible. Le voltmètre peut être souvent remplacé par un galvanomètre, à condition que cet instrument atteigne sa position d'équilibre avec une rapidité suffisante.

250 A titre d'exemple, voici quelques indications sur divers appareils utilisés, notamment pour l'exécution des mesures d) et e).

251 a) *Voltmètre unipivot*. — L'instrument comporte trois échelles à zéro médian (de $-1,25$ à $1,25$ mV ; de -25 à 25 mV ; de -250 à 250 mV). Il présente une résistance de 8 ohms par millivolt de la tension maximum mesurable. Cet instrument, associé à des shunts appropriés, peut aussi être utilisé comme ampèremètre.

252 b) *Millivoltmètre-galvanomètre à miroir*. — Le millivoltmètre utilisé dans le « Tester S A 9069 » de l'Administration britannique des téléphones, est destiné à la mesure de la différence de potentiel entre deux points d'une enveloppe de câble, distants d'un mètre environ.

253 L'appareil est un galvanomètre à miroir comportant un seul enroulement de 10 ohms et qui a une sensibilité telle qu'une déviation de 1 millimètre sur une échelle graduée placée à 17 centimètres du miroir sur le trajet optique du rayon lumineux réfléchi, correspond à 10 microvolts. Ce galvanomètre peut être relié à l'enveloppe du câble directement ou par l'intermédiaire de cordons dont la résistance est déterminée de façon que la sensibilité de l'ensemble prenne une valeur égale à la moitié ou au cinquième de celle qui correspond à l'emploi direct du galvanomètre. Les différences de potentiel maxima qu'on peut mesurer sont suivant la sensibilité ± 500 μ V, ± 1000 μ V, ou ± 2500 μ V. L'échelle comporte trois graduations correspondant à ces sensibilités.

254 c) *Galvanomètre à boucle*. — Un tel galvanomètre consiste en une boucle de ruban mince d'aluminium (de 6 ohms de résistance environ) suspendue entre les pôles de deux aimants permanents. La boucle est extrêmement légère, de sorte que sa déviation est aperiodique ; elle est logée dans une ampoule en verre, de manière qu'elle ne soit pas influencée par les courants d'air. Ses déplacements sont observés au moyen d'un microscope à micromètre.

255 On peut encore projeter sur un film photographique disposé dans une chambre noire, l'image optique d'une petite portion de la boucle éclairée par une lampe à filament incandescent, un seul bord du ruban étant mis au point avec précision

sur le film à travers le système optique : en faisant dérouler le film à une vitesse convenable, on obtient un enregistrement.

256 La boucle peut être montée de deux manières : suivant le montage, l'appareil permet de déceler quelques fractions de microvolt ou quelques microvolts. Sa sensibilité peut être diminuée par adjonction d'une résistance en série. L'étalonnage se fait en appliquant aux fils de connexion une tension connue prise sur un potentiomètre.

257 Malgré sa grande sensibilité, l'appareil est peu influencé par les vibrations mécaniques et peut être installé à l'extérieur.

258 d) *Voltmètre électronique*. — Le voltmètre électronique, dont le schéma de principe est donné par la figure 1, se compose essentiellement de deux tubes à vide sélectionnés à forte pente et à faible courant de grille, montés en pont et alimentés par des piles sèches, et d'un instrument indicateur branché entre les deux circuits de plaque.

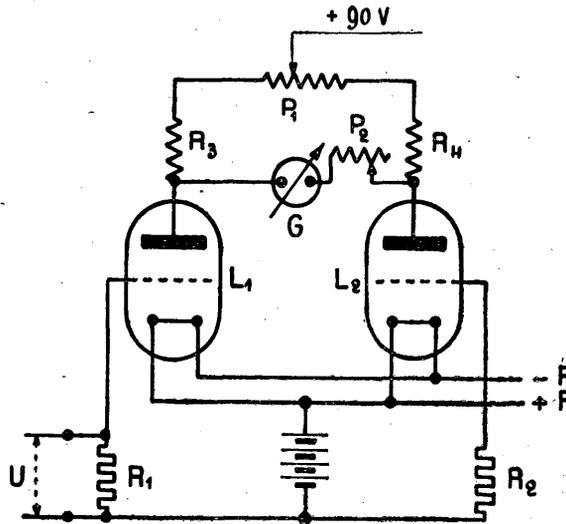


Figure 1

VOLTMÈTRE ÉLECTRONIQUE

P₁ : Tarage de zéro

P₂ : Tarage du maximum de l'échelle

U : Différence de potentiel à mesurer

259 La différence de potentiel à mesurer est appliquée aux bornes d'une résistance de plusieurs mégohms, raccordées à la grille du premier tube à vide. Le second tube à vide, monté symétriquement, a pour but d'équilibrer le pont et de compenser les variations inévitables de tension d'alimentation, ainsi que les surcharges éventuelles.

260 L'appareil fonctionne de la manière suivante : lorsqu'on applique la tension à mesurer à la résistance R₁, la grille du premier tube est portée à un potentiel plus électro-négatif, ce qui fait décroître le courant anodique passant dans la résis-

tance R_3 . La plaque du tube 1, qui, au repos, était au même potentiel que celle du tube 2, est rendue plus positive et la différence de potentiel entre les deux plaques engendre un courant proportionnel à la tension à mesurer et qui est mesuré par l'instrument indicateur G.

261 Les résistances R_3 et R_4 servant d'impédance de plaque des tubes sont calculées de manière à faire travailler ceux-ci dans une région linéaire de leur caractéristique. Il en résulte que les déviations de l'instrument de mesure G sont proportionnelles aux différences de potentiel appliquées à la résistance R_1 .

262 Le tarage du zéro de l'appareil se fait à la mise en marche et une source de tension continue incorporée, servant d'étalon, permet de déterminer la valeur correspondant au maximum de l'échelle.

263 Ces deux réglages peuvent être aisément contrôlés pendant les essais, en manœuvrant un commutateur.

264 Ces tarages se font sur l'échelle de 1,5 V et aucune correction n'est nécessaire pour les autres échelles qui sont automatiquement alignées.

265 En cas de changement de polarité de la tension à mesurer, un inverseur permet de passer instantanément en position de lecture inverse, ceci spécialement pour maintenir la masse du voltmètre (borne positive) au potentiel de la terre.

266 Pour certaines mesures, il est possible de décaler le zéro, de façon à avoir un zéro médian, tout en gardant la même valeur de l'échelle.

267 La résistance d'entrée est de 1 mégohm par volt de la tension maximum mesurable pour les échelles 0 — 1,5 V ; 0 — 5 V ; 0 — 15 V ; 0 — 50 V.

268 Les résistances composant les diviseurs de tension des différentes sensibilités sont choisies les plus stables possibles.

269 Le casier renfermant les piles est soigneusement isolé et comporte une enveloppe en cuivre, mise à la masse pour éviter, par temps humide, toute fuite de courant des piles à la caisse elle-même et de là, au sol, ce qui occasionnerait une perturbation dans la mesure.

A. 2. 2. 3. — Appareils enregistreurs.

270 L'emploi des appareils enregistreurs des types les plus courants n'est possible que dans des cas assez restreints. Ces appareils sont généralement moins sensibles que les appareils indicateurs et leur résistance est souvent insuffisante : on peut remédier à ces inconvénients par l'emploi d'amplificateurs (électroniques, bobinométriques...) pour courant continu.

271 La comparaison des valeurs instantanées relevées par des appareils enregistreurs n'est permise que si les enregistrements ont lieu sur la même feuille ou si les déplacements des feuilles d'inscription sont synchronisés.

272 A titre d'exemples, des indications sont données ci-après sur divers enregistreurs spéciaux.

273 a) *Enregistreur ayant été utilisé par l'Administration britannique des téléphones.* — L'appareil est constitué par deux galvanomètres à boucle placés côte à côte et dont les mouvements des boucles sont enregistrés sur un même film photographique dans les conditions indiquées précédemment. Le déroulement du film s'effectue sous l'action d'un moteur électrique, à une vitesse comprise entre 3 cm et 10 cm par minute. Ce moteur, ainsi que les lampes à projection des galvanomètres, sont alimentés par des batteries portatives et l'ensemble du dispositif est aisément transportable.

274 Lors de l'étalonnage des boucles, on peut régler la résistance en série avec ces boucles pour obtenir la même déviation, lorsque la même tension leur est appliquée.

275 Grâce à ces dispositions, on peut déterminer avec précision les différences entre les valeurs instantanées des tensions enregistrées en deux lieux différents, même si celles-ci présentent des variations rapides.

276 b) *Enregistreur Schlumberger*. — La différence de potentiel à mesurer est appliquée à deux bornes O et L, elle est opposée dans le circuit d'un galvanomètre à cadre G servant d'appareil de zéro, à une différence de potentiel prélevée entre les deux manettes U et D sur une résistance à deux décades placée dans le circuit d'une pile (figure 2). Grâce à un ensemble de résistances auxiliaires en série et en dérivation, l'appareil comporte quatre sensibilités et permet d'exécuter des mesures depuis 0,05 mV jusqu'à 500 mV.

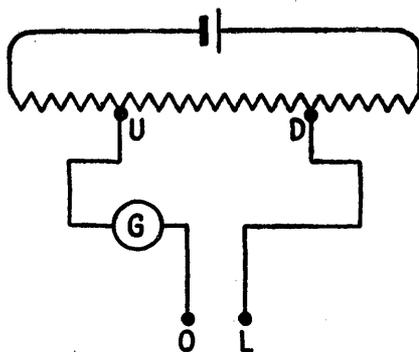


Figure 2

277 Ce potentiomètre est monté sur un enregistreur réalisé de la manière suivante :

278 Un plateau que l'on manœuvre à la main entraîne directement le bouton des unités d'un mouvement continu et indirectement celui des dizaines par un mécanisme analogue à celui des compteurs de tours, de sorte que, chaque fois que le bouton des unités a fait un tour, le bouton des dizaines fait un dixième de tour.

279 Le plateau porte sur sa face postérieure une rainure en spirale d'Archimède. Un doigt fixé sur une réglette horizontale peut glisser dans cette rainure. En faisant tourner le plateau, la réglette avance ou recule d'une quantité proportionnelle aux rotations du plateau, donc aux indications du bouton du potentiomètre, c'est-à-dire aux différences de potentiel mesurées. Ces déplacements sont inscrits à l'aide d'un crayon fixé en bout de réglette, sur une bande de papier se déplaçant d'un mouvement de translation uniforme, perpendiculaire au mouvement de la réglette, sous l'action d'un moteur à ressort.

280 Le synchronisme d'enregistrements simultanés effectués au moyen de plusieurs appareils est assuré par l'inscription périodique simultanée de repères du temps

281 La sensibilité de la méthode est due notamment au fait que :

1. L'opérateur peut procéder instantanément au changement d'échelle le plus favorable,

2. L'énergie nécessaire au fonctionnement de l'enregistreur est fournie par l'opérateur et non par le courant de commande d'un équipement galvanométrique.

282 Cette méthode d'enregistrement s'est révélée parfaitement appropriée à la mesure des courants vagabonds.

A. 2. 2. 4. — *Appareils intégrateurs.*

283 On peut obtenir une valeur moyenne relative à une certaine durée en déterminant par exemple au moyen d'un planimètre, l'ordonnée moyenne de la courbe provenant soit de relevés suffisamment réguliers, soit de l'inscription fournie par un appareil enregistreur convenable. Les appareils intégrateurs du type courant (ampèreheuresmètres, voltheuresmètres, wattheuresmètres) peuvent être utilisés dans les limites où leurs caractéristiques permettent l'exécution des mesures en cause, à condition toutefois qu'on soit assuré de l'invariabilité du sens de la grandeur intégrée, au cours de la durée de l'opération.

A. 2. 2. 5. — *Prises de contact.*

A. 2. 2. 5. 1. — *Contacts métalliques.*

284 Les prises de contact auxquelles on relie un voltmètre doivent être stables et présenter une résistance aussi faible que possible. Elles devraient être d'un métal identique à celui du métal en prise, afin qu'en présence d'humidité, les contacts ne soient pas le siège de couples galvaniques très différents l'un de l'autre. Dans le cas des rails ou des conduites en fonte ou acier, on utilise avec avantage soit des prises de contact en pointeau, en lame de couteau ou en dents de scie, maintenues fortement serrées, soit des aimants; le rail ou la conduite sont préalablement décapés. Pour les enveloppes de câbles, on utilise de préférence des contacts soudés ou fortement serrés.

A. 2. 2. 5. 2. — *Prises de terre.*

285 Le contact du sol avec une simple électrode métallique, même chimiquement inattaquable, donne lieu à la production d'une force électro-motrice de polarisation, très mal définie, variant notablement en fonction du courant passant par l'électrode et susceptible de prendre des valeurs très diverses suivant l'endroit du terrain où l'électrode est placée.

286 Cependant, pour des mesures rapides et grossières, on peut utiliser comme prise de terre, un piquet métallique à polarisation faible (par exemple, piquet de cuivre). Dans le cas de câbles à enveloppe de plomb ou d'alliages de plomb, on obtient des résultats convenables en utilisant une électrode de même nature que l'enveloppe et placée en contact avec le sol humide; si les mesures sont faites dans une conduite ou dans une chambre, on peut employer une électrode constituée par un manchon de plomb contenant une éponge imprégnée de l'eau prise dans la conduite ou dans une chambre, et maintenue en contact avec le plancher de celle-ci. On peut encore, à la rigueur, utiliser comme prise de terre une structure métallique enterrée à condition qu'elle ne soit reliée à aucune canalisation métallique.

287 En tout cas, l'aire de contact entre la prise de terre et le sol ne doit jamais être trop petite, afin d'éviter une polarisation excessive.

288 Pour des mesures précises, on doit employer une électrode impolarisable.

A. 2. 2. 5. 3. — *Electrodes impolarisables.*

- 289 L'emploi d'électrodes impolarisables s'est d'abord imposé dans les essais ayant un caractère de recherche ; depuis quelque temps on a construit des types d'électrodes simples permettant les mesures sur le terrain, ou susceptibles d'être tirées dans une conduite en vue de mesures en des endroits non directement accessibles.
- 290 Les électrodes impolarisables présentent une force électromotrice dépendant de leur constitution, mais qui demeure suffisamment stable moyennant quelques précautions prises au moment de leur emploi. Cette force électromotrice s'ajoute aux différences de potentiel à mesurer : elle doit donc être déterminée préalablement.
- 291 La résistance de contact des électrodes impolarisables avec le sol ou avec une paroi de chambre ou conduite est souvent très élevée et d'ailleurs mal définie. D'autre part, la force électromotrice de l'électrode n'est pas indépendante de la valeur du courant qui la traverse. On peut éliminer ces deux causes d'incertitude en mesurant les différences de potentiel par une méthode potentiométrique ou en utilisant un voltmètre de résistance suffisamment élevée.
- 292 a) *Electrodes au calomel.* — L'électrode au calomel est un étalon de référence pour la détermination de la grandeur désignée en électrochimie sous le nom de « potentiel ».
- 293 1) L'appareil de laboratoire est construit sous forme tubulaire. Au fond du tube est placé un bain de mercure pur recouvert d'une couche de calomel (chlorure mercurieux) pur. L'électrolyte placé au-dessus est une solution de titre déterminé (habituellement solution normale) de chlorure de potassium saturée de calomel. Le contact avec le mercure est établi au moyen d'un fil de platine soudé au travers du verre. L'autre contact est établi par une liaison liquide constituée par une solution saturée de chlorure de potassium contenue dans un tube de verre.
- 294 On admet que le « potentiel absolu » de l'électrode normale au calomel est de + 0,24 volt à 25° C.
- 295 Cette électrode a été utilisée par l'Administration britannique des téléphones pour des mesures dans des conduites, dans les conditions suivantes : on a monté dans une boîte deux électrodes protégées contre les chocs et les variations de température par du caoutchouc et du coton. Le contact avec l'eau de la conduite était établi en prolongeant le tube de verre utilisé ordinairement pour réaliser la liaison liquide, au moyen d'un tube de caoutchouc rempli lui-même d'une solution saturée de chlorure de potassium et terminé par un ajutage explorateur en ébonite rempli d'une épaisse gelée d'agar-agar et d'eau prélevée dans la conduite considérée, afin de réduire au minimum l'importance de la force électromotrice de contact. L'ajutage explorateur était attaché à un assemblage de tiges poussé dans l'alvéole contenant le câble intéressé par les mesures ou dans un alvéole voisin.
- 296 2) Aux Etats-Unis d'Amérique, on a mis au point une électrode au calomel susceptible d'être tirée dans une conduite. Elle est placée dans un support formé d'une bande de plomb servant de protection mécanique pour l'électrode.
- 297 b) *Electrode au chlorure de plomb.* — Cette électrode, établie pour être tirée dans des conduites, consiste en une coque d'ébonite perforée remplie d'une gelée d'agar-agar contenant un mélange saturé de chlorure de plomb et de potassium additionné de glycérine pour que l'agar-agar se dessèche moins vite. Des anneaux de plomb disposés à l'extérieur de l'enveloppe assurent une certaine protection mécanique (figure 3).

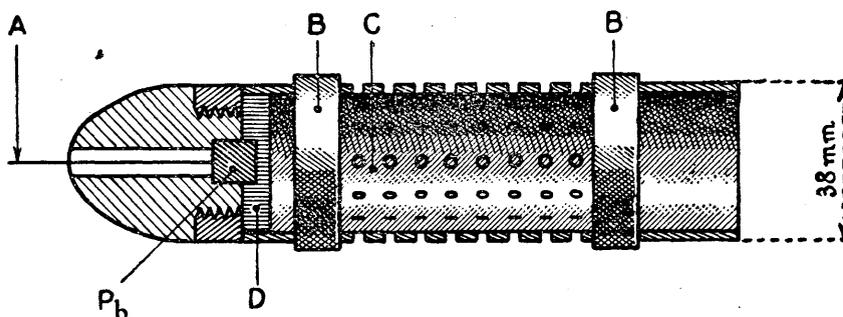


Figure 3

ÉLECTRODE IMPOLARISABLE AU CHLORURE DE PLOMB

- A Fil relié à l'électrode de plomb
- B et B' : Anneaux de plomb à l'extérieur de l'enveloppe
- C Enveloppe d'ébonite perforée
- D Pâte : $\text{Pb Cl}_2 + \text{KCl}$

c) *Electrodes au sulfate de cuivre.*

298 1. — L'électrode est constituée par un tube de cuivre rouge serti dans un vase poreux contenant une solution saturée de sulfate de cuivre dans de l'eau distillée en présence d'un excès de cristaux.

299 Le contact électrique de cette électrode avec le sol est assuré par l'humidité qui filtre à travers la paroi poreuse. Il présente d'ordinaire une résistance élevée.

300 On admet que le « potentiel absolu » de cette électrode est + 0,32 volt à 25° C.

301 L'électrode peut aussi être constituée de la façon suivante. On loge une éponge imbibée de solution de sulfate de cuivre dans une boîte en matière moulée; une tige de cuivre est fixée sur le fond de la boîte et pénètre dans l'éponge. Une certaine quantité de cristaux de sulfate de cuivre est disposée entre l'éponge et le fond de la boîte. Au cours du transport, la boîte est munie de son couvercle, emprisonnant ainsi l'éponge.

302 2. — La figure 4 représente un modèle susceptible d'être tiré dans une conduite et mis au point par l'Administration britannique des téléphones.

303 3. — Le modèle décrit ci-après, utilisé dans des cas spéciaux, a été mis au point pour avoir une résistance relativement faible (quelques dizaines d'ohms). L'électrode est constituée essentiellement par un tube de bois aussi poreux que possible (d'environ 50 à 60 cm de longueur et 4 à 5 cm de diamètre intérieur). Sur ce tube, sont réalisés, d'abord un enrubannage de textile, puis un bobinage de 10 fils de cuivre en parallèle (au total, 55 m de fil de cuivre de 45/100 de millimètre de diamètre, sous deux couches de coton). L'ensemble est recouvert d'une tresse protectrice en ficelle de fouet. Le tube de bois est fermé, à l'une de ses extrémités, par un bouchon que traverse le câble relié, par soudure à l'étain, aux fils de cuivre et destiné à assurer la connexion de l'électrode avec l'appareil de mesure. Des précautions sont prises pour éviter le contact entre l'étain de la soudure et l'électrolyte, et le glissement du câble à travers le bouchon.

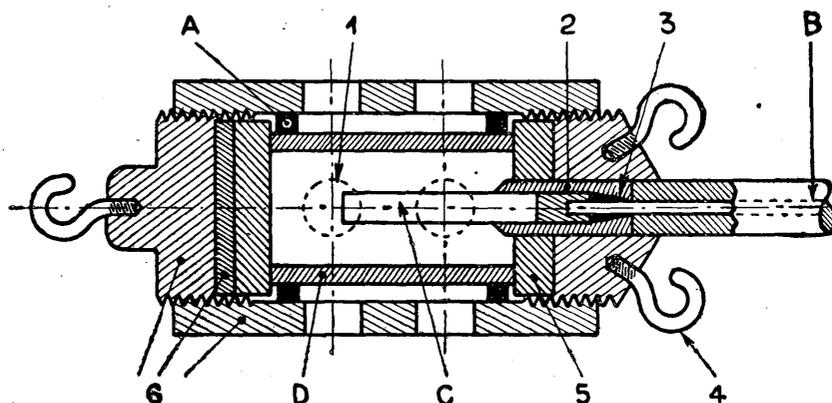


Figure 4

ÉLECTRODE IMPOLARISABLE AU SULFATE DE CUIVRE
(POUR TIRAGE EN CONDUITE)

A : Cale d'ébonite
B : Liaison flexible
C : Tige de cuivre
D : Récipient poreux

1 : Remplissage au moyen d'une pâte à porcelaine saturée de sulfate de cuivre
2 : Colle
3 : Soudure
4 : Cuivre
5 : Caoutchouc
6 : Ebonite

304 Lorsque le montage de l'électrode est terminé, on procède à son imprégnation dans deux solutions successives de sulfate de cuivre.

305 L'intérieur du tube de bois est rempli d'un mélange, à volumes égaux, de sulfate de cuivre finement pulvérisé et de sciure de bois.

306 L'électrode est en principe conservée dans une solution de sulfate de cuivre.

307 Lors de l'emploi de telles électrodes, on a constaté que, lorsqu'on fait des mesures dans des sols très imprégnés d'eau ou en des endroits très humides, la solution de sulfate de cuivre se répand, en peu de temps, dans le milieu entourant l'électrode. Dans ce cas, la concentration de la solution se modifie sans que l'on s'en aperçoive.

308 On évite cet inconvénient, par exemple en montant les électrodes dans des boîtes en plexiglass, dont le fond est en stéatite poreuse et sert de diaphragme électrolytique. Le plexiglass offre l'avantage de pouvoir contrôler facilement l'état de la solution de sulfate de cuivre et la présence de cristaux.

A.2.3. — MESURES DES DIFFÉRENCES DE POTENTIEL

A. 2. 3. 1. — *Mesures entre différents points, soit d'une même structure ou canalisation métallique, soit de structures ou de canalisations métalliques différentes.*

309 Pour ces mesures, on utilise un voltmètre relié à deux prises de contact.

310 Les précautions à prendre pour le choix de l'appareil ou la réalisation des prises de contact ont été indiquées précédemment. Lorsque les deux points entre lesquels on veut mesurer la différence de potentiel sont éloignés, on a recours à des fils pilotes : à moins que la résistance du voltmètre ne soit grande par rapport à la résistance électrique de ces fils, il faut corriger le résultat des mesures pour tenir compte de cette dernière résistance.

A. 2. 3. 2. — *Mesures entre un point d'une structure ou canalisation métallique et une prise de terre.*

311 On ne peut pas, en général, attribuer une signification absolue aux résultats des mesures des différences de potentiel entre une structure ou canalisation métallique et une prise de terre, les résultats dépendant notamment de la nature de cette prise de terre (polarisation), de son emplacement (gradient de potentiel dû aux courants vagabonds éventuellement échangés entre une structure voisine et le sol) et des prises de contact (couples galvaniques).

312 Cependant, quand la valeur de la différence de potentiel mesurée dépasse franchement les limites de l'incertitude due à ces causes, la mesure de la différence de potentiel entre une structure ou canalisation métallique et un point voisin du sol indique le sens de l'échange de courant entre le métal et le sol, et donne même une idée de l'importance de cet échange.

313 D'autre part, si ces causes d'incertitude des mesures de la différence de potentiel demeurent invariables, les variations de cette grandeur qu'on peut déduire des mesures gardent toute leur valeur.

314 En outre, on peut souvent tirer des renseignements utiles de la comparaison entre eux, soit des résultats de telles mesures effectuées à des époques différentes, aux mêmes endroits et dans les mêmes conditions, soit des résultats d'une telle mesure et de ceux d'autres mesures effectuées simultanément.

A.2.4. — DÉTERMINATION DES INTENSITÉS DE COURANT, DES ÉCHANGES DE COURANT ET DES DENSITÉS DE COURANT

A. 2. 4. 1. — *Mesures de l'intensité de courant circulant dans l'enveloppe métallique d'un câble.*

315 Ces mesures ne peuvent être effectuées qu'en des endroits où le câble est accessible (chambres, dans le cas de câbles tirés en conduite, ou fouilles dans le cas de câbles enterrés).

316 Sauf dans le cas de mesures directes, il est nécessaire que le câble soit accessible au moins sur une longueur de l'ordre de quelques décimètres ou un mètre.

317 Dans le cas des câbles armés, si on veut mesurer le courant total circulant dans l'enveloppe et l'armure, celles-ci doivent être reliées métalliquement entre elles de part et d'autre des points où on branche le dispositif de mesure.

318 A. 2. 4. 1. 1. — *Mesure directe.* — La mesure se fait en interrompant la continuité de l'enveloppe du câble et en insérant un ampèremètre répondant aux conditions mentionnées précédemment : la résistance de l'ampèremètre avec son shunt ne devrait jamais dépasser 0,01 ohm.

319 A. 2. 4. 1. 2. — *Mesure par compensation.* — L'intensité des courants vagabonds circulant dans l'enveloppe du câble peut être mesurée en compensant ces courants vagabonds au moyen d'un autre courant provenant d'une batterie auxiliaire, comme il est indiqué sur la figure 5.

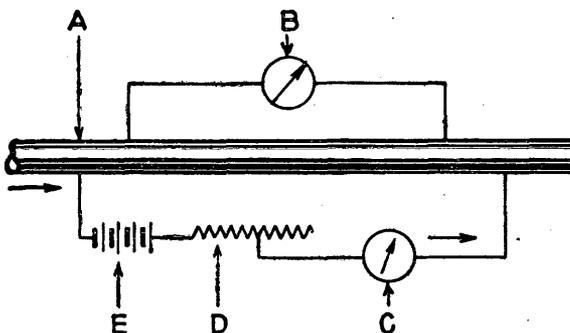


Figure 5

MÉTHODE DE COMPENSATION POUR LA MESURE DE L'INTENSITÉ
DU COURANT CIRCULANT DANS L'ENVELOPPE D'UN CÂBLE

A : Câble B : Instrument de zéro
C : Ampèremètre D : Rhéostat
E : Batterie auxiliaire

320 Le courant provenant de la batterie auxiliaire traverse un ampèremètre, un rhéostat, éventuellement un inverseur, et un court tronçon du câble essayé. Un instrument de zéro (voltmètre ou galvanomètre) est branché en dérivation sur ce tronçon de l'enveloppe du câble, à l'aide de connexions, de préférence soudées, et placées à quelques centimètres des connexions du circuit de compensation et à l'intérieur de celles-ci; on règle le rhéostat, jusqu'à ce que l'aiguille du voltmètre soit au zéro, et on lit alors sur l'ampèremètre l'intensité des courants vagabonds circulant dans l'enveloppe du câble.

321 L'emploi de cette méthode n'est facile que lorsqu'on n'a pas à craindre des inversions fréquentes ou des variations très rapides du courant dans l'enveloppe du câble soumis aux mesures.

322 A. 2. 4. 1. 3. — *Méthode voltométrique.* — On peut déterminer l'intensité du courant circulant dans l'enveloppe du câble en mesurant la chute de tension le long d'un court tronçon dont on connaît la résistance.

323 Cette chute de tension peut être mesurée soit au moyen d'un voltmètre sensible, dont la résistance doit être grande par rapport à celle du tronçon d'enveloppe du câble considéré, soit au moyen d'un potentiomètre, à l'aide d'une méthode d'opposition.

324 L'emploi de la méthode d'opposition n'est facile que lorsqu'on n'a pas à craindre des inversions fréquentes ou des variations très rapides du courant dans l'enveloppe du câble soumis aux mesures.

325 La résistance électrique du court tronçon d'enveloppe du câble peut être :

a) ou bien calculée (si l'enveloppe est uniforme) d'après la longueur, l'aire de la section transversale et la résistivité du métal ;

b) ou bien mesurée au moyen d'un ohmmètre approprié, en utilisant un courant interrompu ou alternatif ;

c) ou bien mesurée en faisant passer dans l'enveloppe un courant d'intensité connue provenant d'une batterie auxiliaire, et en mesurant simultanément la chute de potentiel le long de ce tronçon de l'enveloppe. Il importe alors, ou bien que le courant utilisé ait une intensité grande par rapport à celle des courants vagabonds circulant dans l'enveloppe, ou bien que la mesure soit effectuée à un moment où aucun courant vagabond ne circule dans l'enveloppe. Si l'intensité du courant vagabond est suffisamment constante pendant la mesure, celle-ci peut être effectuée au moyen d'un courant auxiliaire d'intensité moindre : on peut tenir compte de la présence du courant vagabond en effectuant deux mesures successives avec des sens de courant inversés.

326 Les méthodes b) et c) sont suffisamment précises, même si le câble essayé est connecté électriquement à d'autres câbles du même réseau de conduites ou est connecté à une prise de terre voisine, en dehors du court tronçon intéressé, pourvu que cette connexion ou cette prise de terre n'existe que d'un seul côté de ce court tronçon.

A. 2. 4. 2. — *Détermination des échanges de courant entre un câble et le sol, ou entre une voie et le sol.*

327 La détermination de la valeur totale du courant échangé entre une section déterminée de câble ou de voie et le milieu ambiant, peut se déduire du résultat de mesures du courant circulant dans le câble ou la voie, effectuées aux extrémités de la section intéressée. Ces mesures doivent alors être exécutées en même temps de sorte qu'on puisse déterminer la différence entre les résultats de mesures simultanées. Des mesures directes peuvent être effectuées dans le cas des câbles soit par les méthodes de l'enveloppe tronçonnée ou du tube-cuirasse qui demandent un aménagement spécial de la section en cause, soit par les méthodes du pont double à bras constants ou à bras variables qui utilisent des appareils spéciaux. Cette dernière méthode peut également être employée dans le cas des voies de traction.

328 Les méthodes précédentes exigent d'accéder au câble. En raison de leur manque de sensibilité, elles ne sont pratiquement applicables que dans le cas de sections longues, sauf toutefois, les méthodes de l'enveloppe tronçonnée ou du tube cuirasse. Elles donnent un résultat global et ne permettent pas de reconnaître la valeur exacte des échanges de courant, ni même leur sens, aux différents points de la section.

329 Au contraire, dans le cas des câbles directement enterrés, ces derniers renseignements peuvent être obtenus par l'application de la méthode de MM. Schlumberger et Gibrat qui fait appel uniquement à des mesures exécutées à la surface du sol au voisinage du câble, et peut offrir une très grande sensibilité, tout au moins en ce qui concerne les variations de courant. Dans le cas des câbles tirés en conduite, cette méthode permet seulement de déterminer la valeur et le sens du courant échangé entre la conduite et le sol tout le long de la conduite.

330 La détermination des échanges de courant avec le sol se fait généralement pendant des durées plus ou moins longues (une quinzaine de minutes au moins, et même plusieurs heures ou une journée), en vue de déterminer des valeurs moyennes.

331 A. 2. 4. 2. 1. — *Méthode des mesures simultanées.* — Les mesures de courant doivent être effectuées au moyen d'appareils identiques, bien étalonnés l'un par

rapport à l'autre et prenant rapidement leur équilibre : le plus souvent ces mesures sont effectuées par une méthode voltométrique.

332 a) Les mesures peuvent être effectuées par deux opérateurs qui font leurs relevés, par exemple toutes les dix ou quinze secondes : cette méthode doit être mise en œuvre par des opérateurs exercés et ne donne des résultats nets que quand les deux graphiques ainsi obtenus présentent des différences notables.

333 b) On peut encore utiliser deux enregistreurs synchronisés, ayant une sensibilité convenable.

334 L'enregistreur de l'Administration britannique des téléphones, précédemment décrit, a été spécialement étudié en vue de telles mesures : quelques milliampères de courant circulant à travers l'enveloppe d'un câble de gros diamètre suffisent pour donner une déviation lisible sur le film, quand le galvanomètre est mis en dérivation sur une longueur d'un mètre environ. Le synchronisme des enregistrements est réalisé par l'inscription sur un film unique.

335 A. 2. 4. 2. 2. — *Méthode de l'enveloppe tronçonnée.* — Cette méthode peut s'appliquer au cas des câbles non armés. A chaque extrémité de la section à étudier, on pratique une coupure de l'enveloppe du câble. Les éléments de l'enveloppe se trouvant de part et d'autre du tronçon ainsi constitué sont reliés entre eux par une connexion isolée du sol et dont la résistance devrait être voisine de celle du tronçon d'enveloppe. Dans une autre connexion disposée entre le tronçon et l'enveloppe d'une des parties adjacentes est inséré un appareil de mesure de courant : celui-ci indique la valeur et le sens du courant échangé entre le tronçon d'enveloppe et le sol (figure 6).

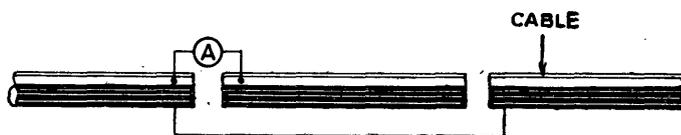


Figure 6

MÉTHODE DE L'ENVELOPPE TRONÇONNÉE POUR LA DÉTERMINATION
DES ÉCHANGES DE COURANT ENTRE UN CÂBLE ET LE SOL

336 A. 2. 4. 2. 3. — *Méthode du tube-cuirasse.* — a) Un manchon métallique ou « tube-cuirasse » est disposé tout autour de l'enveloppe du câble à étudier et séparé de cette enveloppe par une couche isolante. La fouille nécessaire pour mettre en place ce dispositif est comblée de manière à reconstituer le mieux possible les conditions préalables. Des conducteurs isolés A et B soudés respectivement à l'enveloppe et au manchon émergent du sol et un appareil de mesure du courant est inséré entre ces conducteurs (figure 7).

337 Le diamètre extérieur du tube-cuirasse doit être aussi voisin que possible du diamètre du câble étudié ; sa surface doit être de même métal et présenter, autant que possible, les mêmes conditions de contact avec le sol que le câble, afin qu'il soit permis d'admettre que ses conditions d'échange avec le sol sont les mêmes que celles du câble. S'il en est ainsi, cette méthode renseigne sur l'intensité du courant d'échange entre le câble et le sol.

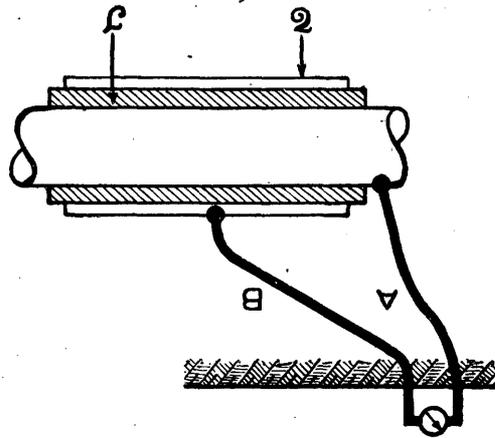


Figure 7

MÉTHODE DU TUBE-CUIRASSE POUR LA DÉTERMINATION
DES ÉCHANGES DE COURANT ENTRE UN CÂBLE ET LE SOL

\mathcal{C} : Tube-cuirasse \mathcal{S} : Isolant

338 *b)* Dans le cas des câbles armés, on peut utiliser les fers d'armure pour constituer le tube-cuirasse. Ces fers sont coupés aux extrémités de la longueur le long de laquelle on veut déterminer les échanges de courant avec le sol : à une de ces extrémités, ils sont reliés entre eux, par exemple au moyen d'un fil soudé, et connectés à l'appareil de mesure de courant. De part et d'autre, des extrémités de la région intéressée, les fers d'armure sont reliés entre eux et connectés à l'enveloppe de plomb du câble.

339 A. 2. 4. 2. 4. — *Méthode du pont double à bras constants* (figure 8). — Soient $A_1 B_1$ et $A_2 B_2$ les extrémités de deux éléments de câbles choisis de manière qu'ils présentent la même résistance électrique R . Ces points sont reliés, aux extrémités d'un pont double comportant quatre résistances r_1 et r'_1 , r_2 et r'_2 , égales entre elles, et dans la diagonale duquel est placé un galvanomètre de résistance r_g .

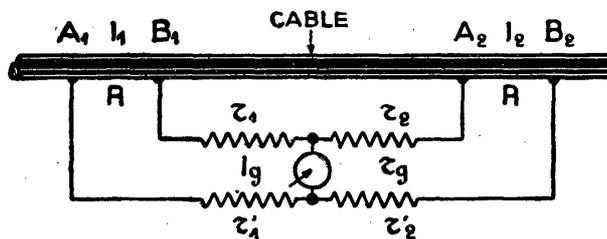


Figure 8

MÉTHODE DU PONT DOUBLE A BRAS
CONSTANTS POUR LA DÉTERMINATION DES ÉCHANGES DE COURANT
ENTRE UN CÂBLE ET LE SOL

340 La valeur commune r de ces quatre résistances doit être telle que le pont double ne dérive aucun courant important.

341 Si I_1 représente l'intensité du courant parcourant l'élément de câble $A_1 B_1$, si I_2 représente l'intensité du courant parcourant l'élément de câble $A_2 B_2$, et si I_g représente l'intensité du courant parcourant le galvanomètre, il est facile de voir que :

$$I_1 - I_2 = - \frac{2 (r + r_g)}{R} I_g$$

342 La connaissance de R , r et r_g permet donc d'obtenir la valeur de la perte du courant entre les deux sections à partir des indications du galvanomètre.

343 Si la résistance r_g du galvanomètre est grande par rapport à la résistance r de chacun des quatre bras du pont double, on a simplement :

$$I_1 - I_2 = - \frac{2 v_g}{R}$$

v_g étant la tension aux bornes du galvanomètre, qui peut alors être un millivoltmètre, de préférence à zéro médian.

344 A. 2. 4. 2. 5. — *Méthode du pont double à bras variables* (figure 9). — Cette méthode permet de déterminer directement le rapport des intensités de courant parcourant deux courtes sections de câble, ou le rapport des intensités de courant parcourant deux courtes sections de voie.

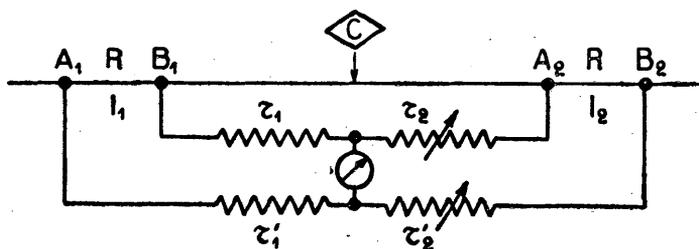


Figure 9

MÉTHODE DU PONT DOUBLE A BRAS VARIABLES
 POUR LA DÉTERMINATION DES ÉCHANGES ENTRE
 UN CÂBLE OU UN RAIL ET LE SOL

C = Câble ou rail

345 Soient A_1 et B_1 , A_2 et B_2 les points qui délimitent deux éléments de même résistance R , dont l'égalité peut se vérifier en mesurant ces résistances, par une des nombreuses méthodes appropriées.

346 Ces points sont reliés, suivant le schéma de montage de la figure aux extrémités d'un pont double comprenant quatre résistances r_1 et r'_1 , r_2 et r'_2 choisies de

sorte que l'intensité du courant dérivé par le pont soit négligeable par rapport à celle qui circule dans le câble ou la voie. Un galvanomètre est placé dans la diagonale.

347 Les résistances r_1 et r'_1 sont fixes et égales entre elles. Les résistances r_2 et r'_2 sont réglables, mais établies de sorte que leurs variations soient simultanées et que leurs valeurs soient toujours égales entre elles.

348 Cela étant, le principe de la mesure est de ramener à zéro l'intensité du courant qui traverse le galvanomètre en ajustant convenablement le rapport

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{r'_1}{r'_2}$$

349 Dans ces conditions, si

I_1 représente le courant parcourant l'élément $A_1 B_1$

I_2 le courant parcourant l'élément $A_2 B_2$,

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_1}{r_2}$$

350 Si on connaît la valeur des résistances des bras de pont et qu'on mesure la chute de tension le long d'une d'elles, on peut déduire du résultat de la mesure au pont double la valeur même de la perte de courant entre les sections $A_1 B_1$ et $A_2 B_2$.

351 Telle qu'elle est décrite ci-dessus, la méthode ne s'applique que si I_1 et I_2 sont de même sens. Dans le cas de mesures effectuées sur des voies de traction électrique, cela exclut la possibilité de faire une mesure quand il se trouve des voitures entre les points A_1 et B_2 .

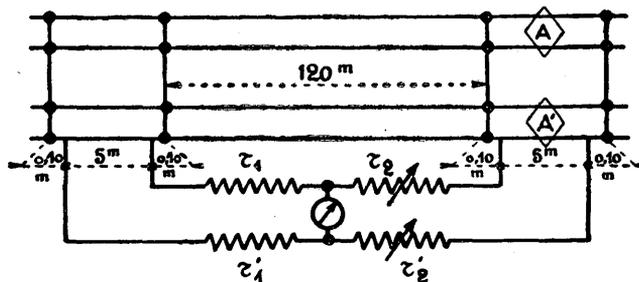


Figure 10

MÉTHODE DU PONT DOUBLE A BRAS VARIABLES
 POUR LA DÉTERMINATION DES ÉCHANGES DE COURANT
 ENTRE DES RAILS ET LE SOL, DANS LE CAS DE PLUSIEURS FILES DE RAILS

A et A' : Files de rails

352 D'autre part, une section de voie comporte au moins deux files de rails, et parfois quatre. Pour que la mesure ait une signification, il faut que dans les sections étudiées, la répartition du courant soit uniforme entre les files de rails en présence. Pour obtenir ce résultat, on dispose de part et d'autre de chacune des sections $A_1 B_1$ et $A_2 B_2$ des connexions transversales soudées de résistance suffisamment faible. La figure 10 montre la disposition de ces connexions et indique un ordre de grandeur, reconnu convenable, des longueurs de section et de la distance entre sections. Dans ces conditions, des essais ont montré que la répartition des courants entre les files de rails était suffisamment uniforme dès que les voitures motrices se trouvaient éloignées de quelques dizaines de mètres des connexions transversales.

353 Cette méthode, d'emploi facile, permet de déterminer la dispersion du courant le long de courtes sections de voie, et ainsi de déterminer les caractéristiques de dispersion d'un réseau de traction et d'exercer, soit un contrôle périodique de telles sections de voie, soit un contrôle général de l'ensemble d'un réseau de traction.

A. 2. 4. 2. 6. — *Méthode de MM. Schlumberger et Gibrat.*

354 a) *But et principe des mesures.* — Le but des mesures est de déterminer la valeur des échanges de courant entre une canalisation enterrée et le sol qui l'environne. Le principe de cette détermination consiste à partir des différences de potentiel à la surface du sol et de la résistivité du terrain pour en déduire la valeur des échanges.

355 Entre deux points de la surface du sol, la différence de potentiel peut être décomposée en trois éléments :

α) une différence de potentiel provenant du courant d'échange entre la canalisation et le sol ;

β) une différence de potentiel provenant de courants d'autres origines (autres canalisations, voies de tramways, courants telluriques, etc...);

γ) une différence de potentiel provenant d'effets électrochimiques dus aux hétérogénéités du terrain.

356 Si les sources perturbatrices sont suffisamment éloignées, et si, à l'endroit de la mesure, le sol est homogène, le deuxième champ considéré sera pratiquement uniforme sur une courte distance et les variations de potentiel correspondantes, suivant une direction quelconque, seront linéaires.

357 b) *Description et emploi du dispositif différentiel* (figure 11). — Le dispositif différentiel est destiné à éliminer l'effet des champs uniformes. Il se compose de trois électrodes impolarisables au sulfate de cuivre, équidistantes M, O, N, disposées suivant une ligne droite.

358 L'électrode centrale O est connectée à un dispositif potentiométrique enregistreur Schlumberger (voir paragraphe A. 2. 2. 3. b), dont la deuxième borne est réunie, au moyen de deux résistances, aux électrodes M et N. Ces résistances sont très grandes en vue d'obtenir entre M et N un courant très faible, qui soit négligeable vis-à-vis du courant vagabond dans la région MON ; en outre, un dispositif spécial permet de faire varier l'une des résistances R de manière à compenser la différence pouvant exister entre les résistances de contact en M et N. Le potentiel de la deuxième borne du dispositif potentiométrique est ainsi rendu égal à la moyenne des potentiels du sol en M et N ; il est certain que, si le courant vagabond général dans le sol, entre M et N, est uniforme, et si le terrain est suffisamment homogène sur cette distance, le potentiel de l'électrode centrale sera aussi égal à la moyenne des potentiels des électrodes extrêmes ; l'indication de l'appareil de mesure sera nulle.

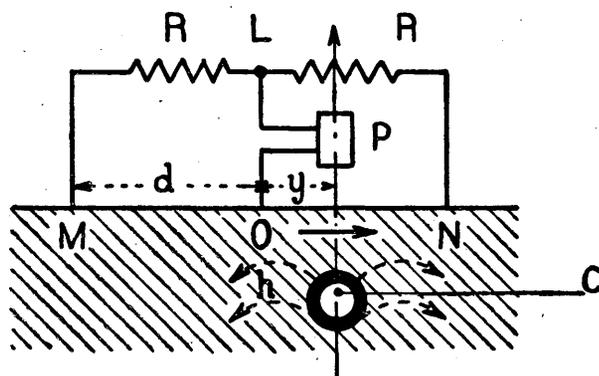


Figure 11

SCHÉMA DU DISPOSITIF DIFFÉRENTIEL DE MESURE
DES COURANTS D'ÉCHANGE AVEC LE SOL

P : Galvanomètre et potentiomètre R : Résistances
C : Canalisation

Note : la flèche en trait plein concerne le courant vagabond général ; les flèches en trait ponctué concernent le courant d'échange

- 359 En pratique, la distance entre électrodes consécutives est soit de 0,50 m, soit de 1 m et l'uniformité du champ du courant vagabond général peut être admise dans la plupart des cas. Mais si, dans le voisinage de l'électrode centrale, se trouve un conducteur échangeant du courant avec le sol, le potentiel de cette électrode ne sera plus égal à la moyenne des potentiels des électrodes extrêmes. On observera, par suite, au moyen du galvanomètre, l'effet de ce courant séparé de tout autre effet.
- 360 On a une approximation très suffisante dans la plupart des cas pratiques en calculant le courant d'échange comme si l'échange était uniforme le long d'une canalisation linéaire et indéfinie.
- 361 Lorsque diverses canalisations émissives sont trop rapprochées pour que le dispositif différentiel soit soumis à l'influence d'une seule à l'exclusion des autres, on peut, en déplaçant les trois électrodes transversalement aux canalisations, tracer un « profil transversal » des mesures faites et calculer l'émission des différentes canalisations.
- 362 c) *Mesures de la résistivité.* — Le calcul de la densité linéique de courant d'échange nécessite la connaissance de la résistivité du sol. Celle-ci est déterminée par exemple par la méthode des quatre électrodes.
- 363 d) *Enregistrements simultanés.* — En pratique, il s'agit presque toujours de mesurer des échanges dus à des courants vagabonds très variables, provoqués par une voie de traction électrique voisine ; or, on doit effectuer successivement des mesures en des lieux différents. En outre, il peut arriver que les différences de potentiel entre électrodes et points hétérogènes du sol ne soient pas négligeables vis-à-vis des valeurs de la tension engendrée par les seuls courants vagabonds entre les points L et O du dispositif différentiel. On obtient des mesures toutes

comparables entre elles et on élimine, en outre, toutes les tensions constantes qui ne sont pas dues aux courants vagabonds en enregistrant simultanément la tension entre la voie de traction et la terre, et la mesure différentielle. Dans la plupart des cas, les variations des deux quantités sont approximativement proportionnelles : le coefficient de proportionnalité entre la variation de la mesure différentielle et la variation de la tension de référence entre voie et terre caractérise chaque mesure.

A. 2. 4. 3. — *Détermination des densités de courant dans le sol.*

364 Certaines méthodes (Haber, Mac Collum) ont été proposées pour déterminer la densité et le sens du courant dans le sol, suivant une certaine direction. En principe, elles devaient permettre d'étudier les conditions d'échange du courant entre le sol et un conducteur directement enterré.

365 Dans le cas d'un câble placé en conduite, elles permettraient seulement de déterminer la région dans laquelle le courant passe de la conduite au sol : dans la réalité, cette région est souvent différente de celle où le courant passe de l'enveloppe du câble à la masse de la conduite.

366 Ces méthodes nécessitent, pour mettre en place les électrodes enterrées, de réaliser des fouilles, ce qui a pour effet d'altérer les conditions qu'on désire étudier et d'affecter gravement le résultat de la mesure.

A.2.5. — MESURE ET CONTROLE DE LA RÉSISTANCE DES JOINTS DE RAILS

367 On convient d'appeler résistance d'un joint de rail, la résistance qu'on peut mesurer entre deux prises de contact placées sur une file des rails, de part et d'autre du joint, à une distance de l'ordre de 0,5 m ou 1 m, défalcation faite de la résistance propre des tronçons de rail englobés.

368 Les méthodes indiquées ci-dessous permettent de déterminer la longueur de rail dont la résistance est équivalente à celle du joint.

369 Dans le cas de réseaux assez étendus et présentant un nombre suffisant de joints de rails, on peut équiper une voiture permettant d'assurer un contrôle rapide et fréquent de la voie, en déterminant simplement ceux des joints dont la résistance paraît élevée. Ceux-ci peuvent alors être vérifiés et éventuellement mesurés après coup.

A. 2. 5. 1. — *1^{re} méthode* (figure 12).

370 a) Un millivoltmètre A est branché en dérivation sur le joint à mesurer. Un second millivoltmètre B est branché en dérivation sur une longueur de rail l_B ne comprenant pas le joint, de l'ordre de quelques mètres ; quand le rail est parcouru par un courant, on effectue simultanément les lectures sur les deux appareils.

371 Si V_A et V_B sont respectivement les chutes de tension mesurées, x la longueur de rail de résistance équivalente à celle du joint, augmentée de la somme des longueurs des tronçons du rail englobés, on a :

$$x = l_B \frac{V_A}{V_B}$$

372 Il y a intérêt que le tronçon l_B soit peu éloigné du joint étudié et de longueur aussi petite que le permet la sécurité des lectures sur le millivoltmètre B.

373 La méthode peut être utilisée en se servant, soit du courant de traction lui-même, soit d'un courant fourni par une source auxiliaire, du même ordre que le courant de traction.

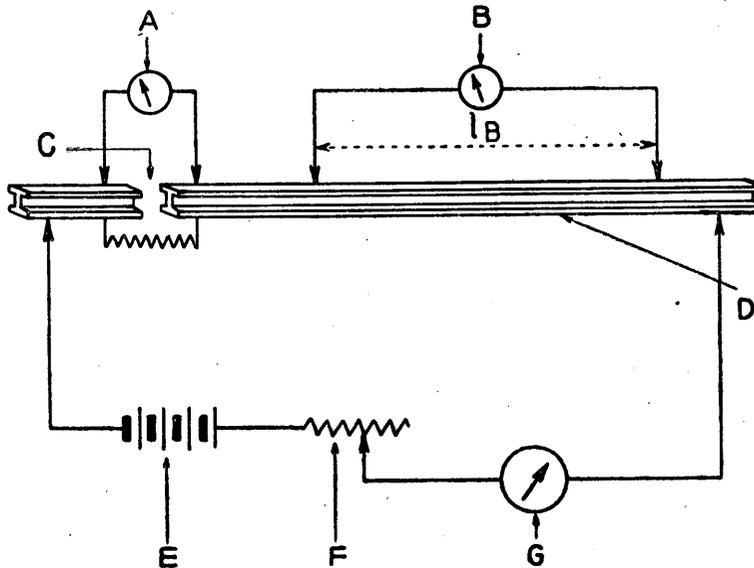


Figure 12

MESURE DES JOINTS DE RAILS PAR LA MÉTHODE DE COMPARAISON

Note : Le montage du bas ne doit être fait que si l'on opère avec du courant fourni par une source auxiliaire

- | | | |
|-----------------|-----------------|-------------------------|
| A : Voltmètre A | C : Joint | E : Batterie auxiliaire |
| B : Voltmètre B | D : Rail | F : Rhéostat |
| | G : Ampèremètre | |

374 b) Une variante de cette méthode, comportant l'emploi du courant d'une source auxiliaire, consiste à utiliser, au lieu du millivoltmètre B, un simple galvanomètre monté en dérivation aux bornes d'une longueur fixe de rail continu, et à régler l'intensité du courant de manière que la lecture du galvanomètre ait une valeur prédéterminée. Le millivoltmètre A peut alors porter une graduation d'échelle appropriée indiquant directement la longueur de rail équivalente au joint, au point de vue de la résistance électrique. Cette méthode est susceptible d'une grande précision.

375 c) Une autre variante de cette méthode repose sur l'emploi d'appareils constitués par deux galvanomètres dont les aiguilles se croisent au-dessus d'un abaque ; la position du point de croisement indique directement la longueur de rail de résistance équivalente à celle du joint. La mesure se fait, sans réglage d'appareil, en se servant soit du courant de traction, soit d'un courant fourni par une source auxiliaire.

A. 2. 5. 2. — 2^{me} méthode (pont de Wheatstone) (figure 13).

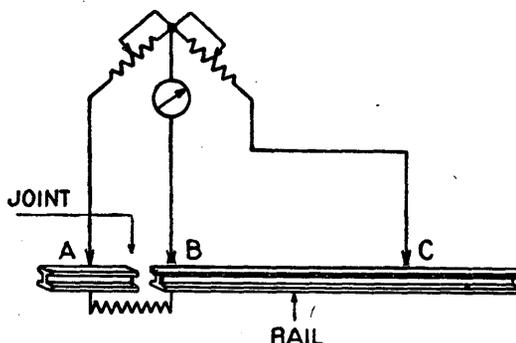


Figure 13

MESURE DES JOINTS DE RAILS PAR LA MÉTHODE DU PONT DE WHEATSTONE

376 La figure indique le principe de la méthode qui peut être appliquée de deux manières :

a) La distance BC représentant une longueur connue de rail, on détermine les résistances des autres bras de pont de manière que le galvanomètre reste au zéro : connaissant le rapport de ces résistances on peut déterminer la longueur de rail de résistance équivalente à celle du joint.

b) Les résistances des bras de pont étant égales et fixes, on déplace le long du rail le contact C jusqu'à ce que le galvanomètre soit encore au zéro. La longueur BC est la longueur du rail de résistance équivalente à celle du joint augmentée de la somme des longueurs des tronçons de rail englobés dans la partie AB.

377 Les deux variantes indiquées de la méthode peuvent être appliquées pendant que le réseau est en exploitation, le courant nécessaire pour la mesure étant alors le courant dans les rails.

378 Cependant si ce courant présente des variations rapides et fréquentes au point de rendre ce moyen de mesure impraticable pendant les heures d'exploitation, la méthode peut encore être appliquée en faisant circuler dans le rail, au lieu du courant de traction, un courant intense et stable fourni par une source auxiliaire branchée de part et d'autre des prises de contact A et C.

A. 2. 5. 3. — 3^{me} méthode.

379 Cette méthode dont les conditions d'emploi sont les mêmes que celles du pont de Wheatstone, consiste à remplacer l'ensemble de la tête de pont et du galvanomètre, par un galvanomètre différentiel, dont les deux enroulements ont un point commun relié à B.

380 a) Un enroulement étant mis en dérivation sur BC, longueur fixe et connue, on règle la valeur d'une résistance intercalée entre le second enroulement et le point A de manière à ramener le galvanomètre au zéro. Un étalonnage préalable indique la correspondance entre la longueur de rail équivalente et la valeur de la résistance disposée en série.

381 b) On peut encore utiliser deux enroulements égaux sans addition de résistance et obtenir le zéro du galvanomètre en déplaçant le long du rail le contact C.

A.2.6. — CONTROLE DE LA SITUATION GÉNÉRALE D'UN RÉSEAU DE TRACTION

382 Il est utile de déterminer la valeur moyenne, pendant une longue durée (par exemple une journée ou encore une certaine période d'exploitation de cette journée) :

a) des courants circulant dans les différentes artères de retour,

b) des différences de potentiel entre un point de référence arbitrairement choisi, et divers points du réseau des rails, notamment, les points d'attache des artères, les extrémités des voies ou leurs points de discontinuité...

383 Lorsqu'à proximité d'un réseau de rails se trouve un réseau étendu de canalisations métalliques enterrées (câbles et conduites) bonnes conductrices et dont la continuité électrique est assurée, on peut admettre que le long de ce réseau de canalisations, les variations de potentiel sont en général d'un ordre de grandeur beaucoup plus faible que ne sont les différences de potentiel observables entre un point des rails et un point voisin des canalisations. Il est alors justifié d'admettre, comme approximation assez grossière, que le réseau des canalisations est équipotentiel et même, si l'étendue de ce réseau est suffisante, que son potentiel diffère peu de celui qu'a le sol en un point infiniment éloigné : ce potentiel peut donc être adopté comme potentiel de référence.

384 Moyennant cette hypothèse, on peut comparer les résultats du calcul des différences de potentiel entre les rails et le sol, conduit comme il est indiqué dans l'annexe I, avec ceux des mesures. L'expérience montre, en effet, que si les joints de voie sont en bon état et si l'estimation des valeurs relatives attribuées aux coefficients de passage a été judicieuse, les valeurs mesurées et calculées concordent dans l'ensemble d'une manière satisfaisante ; un désaccord peut généralement s'expliquer par le fait que les valeurs attribuées dans le calcul aux coefficients de passage ne correspondent pas aux valeurs réelles dans un nombre restreint de sections de voie (par exemple, en raison de l'existence d'une connexion métallique entre rail et canalisation souterraine, ignorée au moment du calcul).

385 Quand on désire obtenir la valeur moyenne pendant une longue durée d'une intensité de courant ou d'une différence de potentiel et qu'on ne peut poursuivre les mesures pendant un intervalle de temps aussi long, on adopte parfois la pratique suivante : les essais sont faits pendant une durée de vingt minutes ou d'une demi-heure au cours d'une période de trafic régulier. Afin de rapporter les résultats observés pendant les essais à l'ensemble de la durée considérée, il est nécessaire de mesurer en même temps la charge de la ligne de traction électrique. On multiplie ensuite la moyenne des valeurs mesurées pendant les essais par le rapport entre la charge moyenne de la ligne pendant toute la durée considérée d'une part, et la charge moyenne pendant les essais d'autre part. Ces charges moyennes s'obtiennent facilement en effectuant les différences de lecture sur des watt-heuremètres placés dans les sous-stations ou à l'entrée des artères d'alimentation.

386 Toutefois, il est extrêmement important que les valeurs de la charge dont on se sert dans ce calcul soient celles de la section de voie considérée. Dans le même ordre d'idées, on doit éviter les erreurs qu'on pourrait commettre si une ou plusieurs sous-stations ne fonctionnaient pas pendant une partie de la longue durée pour laquelle on désire connaître la moyenne.

A.2.7. — CONTROLE DE LA SITUATION GÉNÉRALE D'UN RÉSEAU DE CÂBLES AU POINT DE VUE DE L'EXPOSITION AUX CORROSIONS ÉLECTROLYTIQUES

387 La détermination des zones dans lesquelles les câbles sont le plus exposés à la corrosion électrolytique peut se faire à partir de la mesure de l'intensité du courant circulant dans les enveloppes des câbles, en différents points de leur parcours. Ces mesures peuvent être complétées et même, si leur exécution est trop

malaisée, remplacées par des mesures de différences de potentiel entre le câble et le sol.

388 Il y a intérêt à effectuer ces mesures corrélativement avec celles de la charge des réseaux de traction voisins. D'autre part, ces mesures doivent être éventuellement prolongées pour permettre le calcul d'une valeur moyenne.

389 Dans certains cas, il peut être avantageux d'installer des dispositifs permanents pour l'exécution de la mesure de la tension entre une enveloppe de câble et une électrode enterrée voisine, afin de se rendre compte si la situation du câble, au point de vue de l'exposition aux corrosions électrolytiques demeure stable ou évolue.

390 Lorsqu'on est amené à redouter que les courants vagabonds dus à un ou plusieurs réseaux de traction électrique se manifestent sur des câbles placés à une grande distance des sections de voies d'où sont issus ces courants, la détermination de l'état électrique de ces câbles à partir de mesures faites dans les conditions normales d'exploitation des réseaux est rendue difficile du fait que les courants vagabonds varient d'une manière permanente en intensité, en direction et en polarité. De bons résultats ont été obtenus par l'emploi de la méthode suivante :

391 La nuit, lorsque l'exploitation des tramways ou des chemins de fer électriques est suspendue ou peut être interrompue temporairement, des courants d'intensité connue et provenant des installations de traction électrique sont injectés successivement dans la voie, en un certain nombre de points choisis d'avance. En même temps, on mesure en des points convenables, les courants se produisant simultanément dans les enveloppes métalliques des câbles. Ces expériences peuvent ensuite être complétées par des mesures (faites en des points particuliers), des courants et des tensions se produisant lors de l'exploitation normale des installations électriques.

392 Dans le cas d'un réseau de tramways, les charges « artificielles » visées ci-dessus sont généralement réalisées en branchant des résistances entre le fil de contact et la voie pendant une période d'une demi-minute à deux minutes. Dans le cas d'un réseau de chemin de fer électrifié, on a trouvé convenable de démarrer lentement, au point où le courant doit être injecté, une locomotive dont les freins ont été serrés. Le courant de démarrage est alors enregistré par un appareil à courte durée d'intégration, monté dans la locomotive.

ANNEXE III

ÉTUDES A ENTREPRENDRE EN CAS DE CONSTATATION DE CORROSIONS DE CABLES SOUTERRAINS DE TÉLÉCOMMUNICATION

A.3.1. — DOCUMENTATION A CONSULTER

393 Le service chargé de l'étude devra rassembler les plans suivants, si possible à la même échelle :

1) le plan des câbles de télécommunication dans la zone intéressée avec indication de leur type et de leur mode de pose ;

2) le plan du ou des réseaux de traction électrique avec indication des emplacements des sous-stations d'alimentation, du tracé des artères de retour, des

emplacements des aiguillages ou autres points singuliers, des passages sur ponts ou sur ouvrages métalliques ;

3) éventuellement le plan du réseau de distribution d'énergie à courant continu (sous-stations, canalisations...);

4) éventuellement, le plan des autres câbles et canalisations métalliques (eau, gaz, électricité, etc...) susceptibles de participer aux échanges de courants vagabonds.

394 Il devra encore recueillir les données relatives aux modes de protection déjà mis en œuvre.

395 En outre, il s'efforcera de recueillir les renseignements suivants relatifs aux réseaux de traction électrique : polarité du fil de contact, existence ou non de mises à la terre des sous-stations, mode de pose de la voie (rails enterrés, rails sur plateforme indépendante...) et nature des rails, état des joints, existence de secteurs d'alimentation indépendants, débit des sous-stations, débit des artères de retour, parties du réseau les plus et les moins chargées, durée du service, transformations éventuelles apportées à différentes époques aux conditions d'alimentation du réseau, etc...

396 Il rassemblera enfin les fiches signalant les cas d'électrolyse antérieurement établies et concernant un large secteur comprenant la zone intéressée : l'emplacement de ces corrosions aura d'ailleurs été reporté sur une carte, au fur et à mesure de leur constatation.

A.3.2. — MESURES PRÉLIMINAIRES D'INVESTIGATION

397 L'objet de ces mesures est :

1) de reconnaître s'il existe des courants vagabonds susceptibles d'avoir provoqué les phénomènes de corrosion constatés ;

2) dans l'affirmative, de reconnaître éventuellement quel réseau de traction ou quel réseau de distribution d'énergie électrique peut être mis en cause ;

3) de déterminer, par des moyens simples, les conditions de l'échange des courants vagabonds entre les câbles, canalisations ou voies de traction en présence et le sol, afin de dégager, autant que possible, si ces conditions résultent de la situation générale du réseau produisant les courants vagabonds, ou d'une circonstance accidentelle à laquelle il serait nécessaire de remédier en première urgence.

398 Ces différentes recherches sont conduites au moyen de diverses mesures qui vont être décrites successivement, bien qu'en fait on doive souvent exécuter plusieurs d'entre elles simultanément.

399 Certaines d'entre elles comportent des connexions d'appareils de mesure, aux rails de réseaux de traction électrique. Elles doivent n'être effectuées que moyennant les précautions nécessaires pour n'apporter aucune gêne ou aucun trouble à l'exploitation du réseau : il convient donc de ne les exécuter qu'après entente avec les exploitants du réseau.

A. 3. 2. 1. — *Mesure des différences de potentiel entre le câble et la terre*

400 Ces mesures doivent être effectuées à proximité des endroits où ont été constatés des phénomènes de corrosion, et poursuivies de part et d'autre.

401 D'une manière générale, la constatation de variations brusques et fréquentes de tension est l'indice d'un échange entre le câble et la terre de courants vagabonds provenant le plus souvent d'une installation de traction ou parfois d'une installation de distribution d'énergie par courant continu.

- 402 D'autre part, lorsque le câble est franchement positif par rapport à l'électrode de terre, cela indique qu'il y a sortie de courant du câble vers le sol. Inversement, lorsque le câble est franchement négatif par rapport à l'électrode de terre, cela indique qu'il y a entrée de courant dans le câble.
- 403 Lorsqu'on emploie une prise de terre constituée par une masse ou une tige métallique, une mesure franche est celle qui correspond à des lectures supérieures à un volt (dans un sens ou dans l'autre).
- 404 Une moindre indétermination peut être obtenue lorsqu'on emploie une électrode de même constitution que l'enveloppe du câble.
- 405 Des mesures plus précises avec électrodes impolarisables tarées ne semblent pas nécessaires pour des mesures préliminaires d'investigation.

A. 3. 2. 2. — *Mesure des courants le long de l'enveloppe du câble.*

- 406 Lorsque les circonstances le permettent, on effectue des mesures du courant circulant dans l'enveloppe. La comparaison des résultats de mesures simultanées faites en des points relativement proches, tels que des points situés dans des chambres successives, peut permettre de reconnaître si le tronçon qu'ils délimitent est dans la zone d'entrée ou de sortie du courant.

A. 3. 2. 3. — *Mesure de la chute de tension le long d'un câble.*

- 407 Les mesures simultanées de la chute de tension le long des câbles ont pour objet de déterminer les zones d'entrée et de sortie du courant dans les câbles. Elles doivent être effectuées dans les zones où se sont manifestées des corrosions électrolytiques. Il peut être intéressant de les prolonger de part et d'autre, jusqu'à ce qu'on rencontre des zones dans lesquelles le sens d'échange des courants entre les câbles et le sol est contraire au sens primitivement observé. Il est encore utile de les effectuer dans les zones où on a lieu de redouter des échanges importants, dans un sens ou dans l'autre, de courants avec le sol.
- 408 Ces mesures se font commodément sur des tronçons dont la longueur est de l'ordre de 100 à 150 mètres (distance entre deux chambres de tirage). Elles permettent d'obtenir le maximum de renseignements lorsque, d'une part entre les points de branchement de l'appareil de mesure, le câble n'est en contact avec aucun câble ou aucune canalisation métallique, et que, d'autre part, on connaît sinon la valeur même de la résistance de l'enveloppe entre ces points, du moins une grandeur proportionnelle (par exemple, la longueur du tronçon, si dans la zone explorée, l'enveloppe du câble est de constitution uniforme).
- 409 Lorsque entre les emplacements des points de mesure, il existe plusieurs câbles qui ne peuvent être isolés les uns des autres (par exemple dans le cas d'une conduite unitaire), il convient de traiter l'ensemble des enveloppes comme un seul conducteur et pour cela, de relier entre elles électriquement toutes les enveloppes aux points de mesure. La mesure ne peut être effectuée qu'entre deux points entre lesquels aucun câble ne quitte la canalisation.
- 410 Dans ces conditions, ces données permettent de préciser les indications que l'on peut déduire des mesures décrites précédemment. Elles font connaître en effet le sens et, à un facteur constant près, la valeur moyenne le long du tronçon étudié, du courant parcourant l'enveloppe du câble. En les exécutant simultanément sur des tronçons consécutifs, on peut en déduire par différence, le sens et l'importance des courants échangés entre le câble et le sol.
- 411 Si par exemple, de part et d'autre d'un tronçon déterminé, les chutes de tension correspondent à des courants divergents ou convergents, c'est que dans ce tronçon il y a entrée ou sortie de courant. Il en est de même, si de part et d'autre d'un

tronçon, les chutes de tension correspondent à un sens unique de courant, mais à des valeurs différentes.

412 Il est nécessaire de prolonger ces mesures suffisamment pour pouvoir comparer leurs moyennes.

A. 3. 2. 4. — *Détermination du réseau origine des courants vagabonds.*

413 Cette détermination se fait en comparant les états électriques des enveloppes des câbles dans la zone intéressée, d'une part, quand tous les réseaux susceptibles d'être mis en cause, sont en service, d'autre part quand sur l'un ou plusieurs d'entre eux, le service est arrêté depuis un certain temps.

414 1) Soit à considérer le cas de la coexistence dans la même localité d'un réseau de traction électrique par courant continu et d'un réseau de distribution d'énergie électrique par courant continu.

415 Une première série de mesures sera faite de jour pendant le service du réseau de traction : on devra relever en quelques endroits de la zone intéressée, le graphique des variations pendant un quart d'heure (cette durée devant comporter une circulation sur les lignes où les passages de voiture sont espacés) et dans les conditions indiquées précédemment aux paragraphes A. 3. 2. 3 et A. 3. 2. 1, soit de la chute de tension le long d'une certaine longueur de câble, soit des différences de potentiel entre le câble et la terre.

416 Simultanément, on relèvera dans des conditions analogues le graphique des variations de la différence de potentiel existant entre les rails et une prise de terre, à proximité du lieu où sont effectuées les mesures précédentes.

417 Une seconde série de mesures, effectuées dans les mêmes conditions, sera faite après que le service du réseau de traction sera terminé, depuis plusieurs heures si possible.

418 Si lors de la seconde série de mesures, les chutes de tension observées le long du câble sont inappréciables ou simplement beaucoup plus faibles que la moyenne de celles qui ont été observées lors de la première série, le réseau de distribution d'énergie électrique peut être mis hors de cause.

419 Dans le cas contraire, il peut y avoir doute.

420 D'autre part, si au cours des mesures de la première série, on constate que la chute de tension le long du câble, ou la différence de potentiel entre le câble et le sol présentent des variations brusques simultanées et grossièrement proportionnelles à celles de la différence de potentiel entre la voie et le sol, il est permis de conclure que le réseau de traction électrique peut certainement être mis en cause.

421 2) Lorsqu'il existe dans la même localité deux réseaux de traction électrique et un réseau de distribution par courant continu, et qu'il est possible de faire des observations alors que sur les deux réseaux de traction le service est interrompu, on procède de la même manière pour déterminer si le réseau de distribution peut être mis hors de cause.

422 Lorsqu'on est en présence d'un réseau de traction dont le service est interrompu pendant une partie de la nuit, et d'un réseau de traction dont le service est permanent (ce peut être le cas des réseaux de chemin de fer d'intérêt général), on procède à des essais analogues durant la suspension de service du premier et au cours de la circulation de trains sur le second. Si aucune variation brusque de la chute de tension le long du câble, ou de la différence de potentiel entre le câble et le sol, n'est constatée au cours de la marche des trains, on peut présumer que le réseau de traction alors en service peut être mis hors de cause. Dans le cas contraire, mais si pourtant les variations observées quand un seul réseau est en

service sont beaucoup plus faibles que celles que l'on constate pendant la journée, on peut admettre provisoirement que le réseau de service intermittent est l'origine de la partie la plus importante des courants vagabonds se manifestant dans la zone considérée, et on peut poursuivre les essais comme s'il était seul en cause.

A. 3. 2. 5. — *Détermination des zones dans lesquelles le courant s'échappe des rails pour entrer dans le sol et de celles dans lesquelles le courant du sol rentre dans les rails.*

423 Cette détermination doit être faite lorsqu'on a constaté que la corrosion électrolytique peut être imputée à un réseau de traction.

424 Elle peut se faire au moyen de mesures de la différence de potentiel entre les éléments du réseau des rails, et les éléments de canalisations métalliques enterrées voisines (notamment les câbles de télécommunication et les conduites d'eau).

425 Pour éviter les fouilles, on branche l'appareil de mesure entre le rail et une masse métallique accessible (boîte de jonction, bouche à clé, etc...).

426 Lorsque la moyenne des mesures faites en un poste de mesure, pendant une dizaine de minutes, correspond au cas de rails franchement positifs par rapport aux canalisations métalliques voisines, on doit considérer comme très probable qu'en cet endroit il y a émission par les rails de courants vagabonds dans le sol.

427 D'autre part, on peut également présumer que les entrées de courant dans les enveloppes des câbles de télécommunication ont lieu dans les régions où les câbles sont franchement négatifs par rapport à la voie et que les sorties de courant ont lieu dans les zones où les câbles sont franchement positifs par rapport à la voie.

428 Une mesure franche est celle qui correspond à une moyenne des lectures supérieures à un volt.

429 Les mesures précédentes sont à effectuer en des points distants entre eux de 100 à 200 mètres, dans les régions où se sont manifestés déjà des phénomènes d'électrolyse ou bien dans lesquelles on a quelque raison de redouter des échanges importants de courant entre les câbles et le sol. Elles doivent être prolongées, de part et d'autre de ces régions autant qu'il faut pour rencontrer des zones dans lesquelles le sens d'échange des courants entre la voie et le sol est contraire au sens primitivement observé.

430 Leurs résultats peuvent être complétés ou précisés, en ce qui concerne l'échange de courants entre les câbles et le sol, par l'exécution en certains points des essais décrits précédemment aux paragraphes A. 3. 2. 1 et A. 3. 2. 3.

A. 3. 2. 6. — *Interprétation générale des mesures précédentes.*

431 L'ensemble de toutes les mesures qui viennent d'être décrites permet généralement de dégager en quelles zones se font les échanges des courants vagabonds avec le sol.

432 Quand l'importance des courants vagabonds est surtout accusée dans une zone relativement peu étendue, on doit rechercher, en premier lieu, s'il n'y a pas dans cette zone quelque circonstance accidentelle à laquelle il conviendrait de remédier en première urgence (mauvais état de la voie, rupture d'éclisse, inefficacité des connexions destinées à assurer la continuité électrique de la voie en des points singuliers tels qu'aiguillages, passages sur pont mobile, etc..., état défectueux de l'isolement, de la continuité des artères de retour et de leurs attaches aux rails, contact fortuit de la voie ou des câbles de télécommunication avec des structures métalliques enterrées, etc...).

433 Quand les courants vagabonds varient d'une manière sensiblement continue le long de la voie ou le long des canalisations, il est à présumer que les effets constatés dépendent de la situation générale du réseau produisant les courants vagabonds et qu'une amélioration n'est guère à attendre que de dispositions d'ensemble.

A.3.3. — ÉTUDES COMPLÉMENTAIRES

434 Si les mesures préliminaires d'investigation précédemment décrites ne permettent pas de reconnaître l'origine des courants vagabonds ayant causé la corrosion électrolytique, ou ne suffisent pas pour déterminer les remèdes à employer pour améliorer la situation, une étude complémentaire doit être entreprise par un service disposant d'un personnel spécialisé et d'un appareillage de mesure plus complet.

ANNEXE IV

MISE EN ŒUVRE D'UNE PROTECTION ÉLECTRIQUE

A.4.1. — GÉNÉRALITÉS

435 Pour assurer la protection électrique d'une structure métallique enterrée ou immergée, il faut la porter à un potentiel suffisamment électronégatif par rapport au milieu ambiant. La valeur généralement admise pour le plomb est de — 0,55 volt quand on utilise une électrode de référence au sulfate de cuivre. Pour le fer, la valeur correspondante est de — 0,85 volt.

436 Il n'est pas possible de fixer une méthode rigide pour les dispositions à prendre en vue de l'application d'une protection électrique. En effet, les conditions varient fortement suivant l'importance des courants vagabonds, la nature du sol, la conductance longitudinale du câble (ou de la canalisation) à protéger, éventuellement l'existence et la qualité de son revêtement protecteur, et la présence d'autres canalisations ou câbles enterrés.

437 En général, la mise en œuvre d'une protection électrique comportera les trois phases successives suivantes :

1) L'étude préliminaire des terrains qui sont ou seront traversés par la ou les canalisations à protéger (résistivité, gradient de potentiel...);

2) l'exécution des essais spéciaux pour déterminer les modalités d'application pratique de la protection électrique et la détermination précise de l'appareillage de protection, le contrôle de l'efficacité de la protection réalisée, le réglage de la répartition des potentiels et courants ;

3) l'adoption de dispositions complémentaires éventuelles eu égard à la présence d'autres structures voisines.

A.4.2. — ÉTUDE PRÉLIMINAIRE

438 Il est généralement utile de dresser une carte des valeurs moyennes et extrêmes de la différence de potentiel entre les rails du ou des réseaux de traction électrique et le sol. Il faut en outre rassembler une documentation suffisamment complète sur le système d'alimentation et de retour des courants de ces réseaux.

439 S'il s'agit de protéger des canalisations existantes, il convient de dresser une carte des différences de potentiel entre différents points desdites canalisations et les points voisins du sol.

440 Ces mesures préalables seront éventuellement complétées par des mesures de différence de potentiel entre structures enterrées voisines.

441 Enfin, on procédera aux mesures des résistances apparentes soit entre rails et canalisations, soit éventuellement entre canalisations voisines.

442 L'étude préalable ainsi entreprise conduit tout d'abord à la détermination :

1) des tronçons des câbles ou canalisations à protéger qui doivent être isolés par rapport à certaines structures métalliques importantes (ponts, charpentes...);

2) des embranchements qui doivent être isolés des câbles ou des canalisations à protéger, dont ils dérivent.

443 Elle permet ensuite de dresser un programme des essais à réaliser en vue de la mise en œuvre de la protection électrique, à savoir :

1) l'établissement d'une ou de plusieurs connexions entre le câble ou la canalisation à protéger et le réseau de traction électrique ;

2) l'installation éventuelle de connexions entre canalisations souterraines rapprochées.

A.4.3. — ESSAIS DE DRAINAGE OU DE SOUTIRAGE

444 Ces essais comprennent généralement les enregistrements, pendant 24 heures :

1) de la différence de potentiel entre rails et canalisations au droit de chaque point choisi pour l'installation d'un drain ;

2) de l'intensité du courant drainé par chacun de ces drains.

445 Les diagrammes enregistrés permettent de déterminer les valeurs extrêmes dans le sens voulu pour le drainage et dans le sens inverse. Un planimétrage fournit la valeur moyenne.

446 Pendant l'enregistrement du courant circulant dans les drains considérés, des relevés de différences de potentiel entre câbles ou canalisations et le sol sont effectués en différents points, de manière à fixer approximativement les valeurs moyennes minima des courants drainés qui assureraient une protection convenable, sur toute leur longueur, des câbles ou canalisations à protéger.

447 Les enregistrements successifs de la différence de potentiel et du courant de court-circuit aux différents points choisis permettent de déterminer, au droit de ceux-ci, les résistances apparentes entre rails et canalisations.

448 Si l'on constate des inversions du sens du courant dans un ou plusieurs drains il convient d'y insérer un dispositif unidirectionnel (drainage polarisé), sauf s'il s'agit d'inversions très rares, de courte durée, avec une faible intensité de courant.

449 Quand la protection n'est pas assurée sur toute la longueur des câbles ou canalisations à protéger, il faut prendre d'autres dispositions, soit l'augmentation du nombre des drains, soit le remplacement d'un ou plusieurs drains par des postes de soutirage.

450 Si, pour le but à atteindre, l'intensité du courant dans un drain est trop élevée, on insère dans ce drain une résistance appropriée.

451 Pour faire un essai de soutirage, on intercale dans le drain une batterie de forte capacité et l'on procède aux mêmes enregistrements et relevés que ci-dessus, en insérant successivement dans le circuit de drainage des forces électromotrices différentes, par exemple : 2 volts et 4 volts.

- 452 La mesure du potentiel (par rapport au sol) des câbles ou des canalisations à protéger permet de prédéterminer exactement la caractéristique à donner à l'appareil de soutirage pour assurer une répartition convenable du potentiel de protection.
- 453 Cependant, si l'on ne peut pas trouver sur les rails, pour les attaches des drains, des points d'accès favorable et n'ayant pas d'autre part un potentiel positif trop élevé, il convient de renoncer à l'utilisation des rails comme anode et d'avoir recours (malgré la résistance plus élevée de passage du courant vers le sol) à des anodes indépendantes placées en des points judicieusement choisis.
- 454 Pour améliorer la répartition du potentiel de protection le long des câbles ou canalisations à protéger, on peut dans certains cas envisager l'intercalation de quelques joints résistants à des emplacements appropriés sur ces câbles ou canalisations.

A.4.4. — CONNEXIONS DE PROTECTION ENTRE CANALISATIONS SOUTERRAINES

- 455 Il convient fréquemment d'étendre la protection électrique à des ouvrages voisins en les reliant par des connexions spéciales aux canalisations ou câbles directement protégés. Une méthode graphique simple permet de déterminer la résistance à donner à ces connexions de protection, compte tenu éventuellement de la nature différente des métaux dont sont constitués les ouvrages intéressés.
- 456 Parfois, il est nécessaire d'intercaler dans ces connexions une ou des cellules redresseuses lorsque des inversions appréciables de courant y sont constatées. En pareil cas, il faut tenir compte de la caractéristique de ces cellules redresseuses dans la détermination de la résistance des connexions de protection.
- 457 Il arrive également qu'il soit nécessaire d'intercaler dans la connexion de protection une bobine d'inductance, si on veut éviter le passage de courants alternatifs nuisibles pour les cellules redresseuses ou les câbles de télécommunication.
-

TABLE DES MATIÈRES

Préambule	3
CHAPITRE I. — Introduction.	4
CHAPITRE II. — Réduction des courants vagabonds.	7
2.1. — Généralités.	7
2.2. — Voie de roulement.	7
2.3. — Artères de retour et barres collectrices.	9
2.4. — Limitation des différences de potentiel.	10
2.5. — Polarité des fils de contact.	10
2.6. — Trolleybus	11
2.7. — Mesures périodiques de contrôle.	11
CHAPITRE III. — Réduction des effets nuisibles des courants vagabonds	13
3.1. — Tracé et pose des câbles	13
3.2. — Conduites, caniveaux, galeries.	13
3.3. — Isolement des enveloppes.	14
3.4. — Câbles armés	15
3.5. — Cloisonnement	15
3.6. — Protection électrique.	16
CHAPITRE IV. — Protection par limitation des courants vagabonds	17
4.1. — Dispositions concernant les réseaux de traction	17
4.2. — Dispositions concernant les réseaux de câbles souterrains	19
CHAPITRE V. — Protection électrique.	20
5.1. — Généralités.	20
5.2. — Conditions générales de mise en œuvre.	20
5.3. — Modalités d'exécution de la protection électrique.	22
5.3.1. — Drainage électrique direct.	22
5.3.2. — Drainage électrique polarisé.	22
5.3.3. — Drainage électrique avec réglage aux potentiels négatifs minima.	22
5.3.4. — Soutirage électrique (ou drainage forcé).	23
5.3.5. — Protection cathodique avec anode enterrée	23
5.4. — Conservation des structures voisines.	24
Annexe I — Principe du calcul de la répartition des tensions dans le réseau des rails d'une installation de traction. Notion de différence de potentiel entre les rails et le sol.	26
A.1.1. — Répartition des tensions dans le réseau des rails.	26
A.1.2. — Notion de différence entre le potentiel du rail et le potentiel conventionnel du sol.	29

Annexe II — Mesures électriques	32
A.2.1. — Introduction	32
A.2.2. — Appareillage d'emploi général	33
A.2.2.1. — Ampèremètres	33
A.2.2.2. — Voltmètres et galvanomètres indicateurs	33
A.2.2.3. — Appareils enregistreurs	36
A.2.2.4. — Appareils intégrateurs	38
A.2.2.5. — Prises de contact	38
A.2.2.5.1. — Contacts métalliques	38
A.2.2.5.2. — Prises de terre	38
A.2.2.5.3. — Electrodes impolarisables	39
A.2.3. — Mesures des différences de potentiel	42
A.2.3.1. — Mesures entre différents points, soit d'une même structure ou canalisation métallique, soit de structures ou de canalisations métalliques différentes	42
A.2.3.2. — Mesures entre un point d'une structure ou canalisation métallique et une prise de terre	42
A.2.4. — Détermination des intensités de courant, des échanges de courant et des densités de courant	42
A.2.4.1. — Mesures de l'intensité de courant circulant dans l'enveloppe métallique d'un câble	42
A.2.4.2. — Détermination des échanges de courant entre un câble et le sol, ou entre une voie et le sol	44
A.2.4.3. — Détermination des densités de courant dans le sol	51
A.2.5. — Mesure et contrôle de la résistance des joints de rails	51
A.2.6. — Contrôle de la situation générale d'un réseau de traction	54
A.2.7. — Contrôle de la situation générale d'un réseau de câbles au point de l'exposition aux corrosions électrolytiques	54
Annexe III. — Etudes à entreprendre en cas de constatation de corrosions de câbles souterrains de télécommunication	55
A.3.1. — Documentation à consulter	55
A.3.2. — Mesures préliminaires d'investigation	56
A.3.2.1. — Mesure des différences de potentiel entre le câble et la terre	56
A.3.2.2. — Mesure des courants le long de l'enveloppe du câble	57
A.3.2.3. — Mesure de la chute de tension le long d'un câble	57
A.3.2.4. — Détermination du réseau origine des courants vagabonds	58
A.3.2.5. — Détermination des zones dans lesquelles le courant s'échappe des rails pour entrer dans le sol et de celles dans lesquelles le courant du sol rentre dans les rails	59
A.3.2.6. — Interprétation générale des mesures précédentes	59
A.3.3. — Etudes complémentaires	60
Annexe IV — Mise en œuvre d'une protection électrique	60
A.4.1. — Généralités	60
A.4.2. — Etude préliminaire	60
A.4.3. — Essais de drainage ou de soutirage	61
A.4.4. — Connexions de protection entre canalisations souterraines	62

