

**CAPACITES DE TRANSPORT DES CABLES
POUR LES REGIMES DE CHARGE CYCLIQUES
ET DE SECOURS D'URGENCE**

***CURRENT RATINGS OF CABLES FOR CYCLIC
AND EMERGENCY LOADS***

**Groupe de Travail 02
du Comité d'Etudes 21 (Câbles à haute tension)**

***Working Group 02
of Study Committee 21 (HV Cables)***

1972



COMMUNICATIONS

CAPACITÉS DE TRANSPORT DES CABLES POUR LES RÉGIMES DE CHARGE CYCLIQUES ET DE SECOURS D'URGENCE

*rapport présenté par le Groupe de Travail 02
(Capacités de transports des câbles)
du Comité d'Etudes n° 21
(Câbles à haute tension) et publié à la demande du
Président du Comité, M. A.S. BROOKES*

Première partie

CAPACITÉS DE TRANSPORT CYCLIQUES (FACTEUR DE CHARGE INFÉRIEUR A 100 %) ET RÉPONSE A L'APPLICATION D'UN ÉCHELON

Liste de symboles.

D_e	diamètre extérieur de l'enveloppe du câble, m ,
D_i	diamètre extérieur du diélectrique, m ,
D_s	diamètre intérieur de l'enveloppe du câble, m ,
F	coefficient d'échauffement mutuel d'un groupe de câbles,
I	intensité de courant admissible pour une condition donnée (normalisée), A ,
L	profondeur axiale d'enterrement d'un câble ou d'un fourreau, m ,
M	facteur de capacité de transport cyclique,
N	nombre de câbles d'un groupe,
Q	capacité calorifique totale d'un câble $Jm^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$,
Q_A, Q_B	éléments de deux circuits thermiques partiels, voir paragraphe 3.2.3, $Jm^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$,
Q_a	capacité calorifique de l'armure, $Jm^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$,
Q_c	capacité calorifique du conducteur, $Jm^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$,
Q_d	capacité calorifique d'un fourreau, $Jm^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$,
Q_f	capacité calorifique du remplissage dans un câble triplomb ou du remplissage entre

PAPERS

CURRENT RATINGS OF CABLES FOR CYCLIC AND EMERGENCY LOADS

Paper presented by Working Group 02
(Cable Rating Factors)
of Study Committee No. 21 (H. V. Cables)
and published at the request of the Chairman
of the Committee Mr. A.S. BROOKES

Part 1

CYCLIC RATINGS (LOAD FACTOR LESS THAN 100 %) AND RESPONSE TO A STEP FUNCTION

List of symbols.

D_e	<i>external diameter of cable covering, m,</i>
D_i	<i>external diameter of dielectric, m,</i>
D_s	<i>internal diameter of cable covering, m,</i>
F	<i>mutual heating coefficient for a group of cables,</i>
I	<i>permissible current for given (standard) condition A,</i>
L	<i>axial depth of burial of a cable or duct, m,</i>
M	<i>cyclic rating factor,</i>
N	<i>number of cables in a group,</i>
Q	<i>total thermal capacitance of a cable, $Jm^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$</i>
Q_A, Q_B	<i>elements of two part thermal circuit, see section 3.2.3, $Jm^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$,</i>
Q_a	<i>thermal capacitance of armour, $Jm^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$,</i>
Q_c	<i>thermal capacitance of conductor, $Jm^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$,</i>
Q_d	<i>thermal capacitance of a duct, $Jm^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$,</i>
Q_f	<i>thermal capacitance of filling in S.L. type cables, or of filling between cores</i>

	noyaux d'un câble en tuyau à pression de gaz, $Jm^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$,		of a gas pressure pipe type cable, $Jm^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$,
Q_i	capacité calorifique du diélectrique, $Jm^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$,	Q_i	thermal capacitance of dielectric, $Jm^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$,
Q_j	capacité calorifique du revêtement extérieur du câble, $Jm^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$,	Q_j	thermal capacitance of outer covering of cable, $Jm^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$,
Q_o	capacité calorifique de l'huile dans un câble en tuyau, $Jm^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$,	Q_o	thermal capacitance of oil in a pipe type cable, $Jm^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$,
Q_p	capacité calorifique d'un tuyau, $Jm^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$,	Q_p	thermal capacitance of a pipe, $Jm^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$,
Q_s	capacité calorifique d'une gaine et de son frettage, $Jm^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$,	Q_s	thermal capacitance of sheath and reinforcement, $Jm^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$,
T	résistance thermique totale d'un câble entre le conducteur et la surface extérieure, $^\circ C m W^{-1}$. Sert aussi à indiquer le temps mesuré en heures dans les formules de capacité de transport cyclique,	T	total thermal resistance of a cable from conductor to outer surface, $^\circ C m W^{-1}$. Also used to indicate time when this is measured in hours in cyclic rating formulæ,
T_1	résistance thermique du diélectrique par conducteur, $^\circ C m W^{-1}$,	T_1	thermal resistance of dielectric per conductor, $^\circ C m W^{-1}$,
T_2	résistance thermique du gaz dans un câble en tuyau à pression de gaz, $^\circ C m W^{-1}$,	T_2	thermal resistance of gas in a gas pressure pipe type cable, $^\circ C m W^{-1}$,
T_3	résistance thermique du revêtement extérieur d'un câble, $^\circ C m W^{-1}$,	T_4'	thermal resistance of outer covering of a cable, $^\circ C m W^{-1}$,
T_4	résistance thermique extérieure d'un câble ou d'un fourreau $^\circ C m W^{-1}$,	T_4	external thermal resistance of a cable or a duct, $^\circ C m W^{-1}$,
T_4'	résistance thermique de l'espace d'air dans un fourreau, $^\circ C m W^{-1}$,	T_4'	thermal resistance of air space in a duct, $^\circ C m W^{-1}$,
T_4''	résistance thermique d'un fourreau, $^\circ C m W^{-1}$,	T_4	thermal resistance of a duct, $^\circ C m W^{-1}$,
ΔT_4	résistance thermique extérieure additionnelle causée par l'échauffement dû à d'autres câbles du groupe, $^\circ C m W^{-1}$,	ΔT_4	additional external thermal resistance caused by heating from other cables in a group, $^\circ C m W^{-1}$,
T_f	résistance thermique du bourrage entre pôles d'un câble triplomb ou d'un câble en tuyau à pression de gaz, $^\circ C m W^{-1}$,	T_f	thermal resistance of filling between cores of S.L. type cable and of gas-pressure pipe-type cable, $^\circ C m W^{-1}$,
T_o	résistance thermique de l'huile dans un câble en tuyau, $^\circ C m W^{-1}$,	T_o	thermal resistance of the oil in a pipe-type cable, $^\circ C m W^{-1}$,
W_o	perte de puissance dans un conducteur ou dans un conducteur équivalent, $W m^{-1}$,	W_o	power loss in a conductor or equivalent conductor, $W m^{-1}$,
W_f	perte totale par effet Joule de chaque câble, $W m^{-1}$,	W_f	total I^2R power loss of each cable, $W m^{-1}$,
W_d	perte de puissance dans le diélectrique d'un câble, $W m^{-1}$,	W_d	power loss in cable dielectric, $W m^{-1}$,
$Y_0 \dots Y_{23}$	ordonnées réduites dans un diagramme en (charges) ² , utilisé pour le calcul du facteur de capacité de transport cyclique,	$Y_0 \dots Y_{23}$	scaled ordinate in (load) ² graph, used in calculation of cyclic rating factor.
d	densité du sol à sec, $kg \cdot m^{-3}$,	d	dry density of soil, $kg \cdot m^{-3}$,
d_o	diamètre intérieur du diélectrique, m ,	d_o	inner diameter of dielectric, m ,
d_f	distance du centre du câble le plus chaud pour une source unifilaire représentant l'effet d'échauffement dû à tous les autres câbles d'un groupe, m ,	d_f	spacing from centre of hottest cable for a single line source representing the heating effect of all other cables in a group, m ,
d_{pk}	distance du centre du p^{me} câble dont on détermine la capacité de transport, à un câble adjacent k , m ,	d_{pk}	distance from centre of p^{th} cable, where rating is being determined to an adjacent cable k , m .
d'_{pk}	distance du centre du p^{me} câble, dont on détermine la capacité de transport, à	d'_{pk}	distance from centre of p^{th} cable, whose rating is being determined, to the image

	l'image d'un câble adjacent k, m (voir publication CEI 287, fig. 1),		of an adjacent cable k, m (see IEC Publication 287, Fig. 1).
h	coefficient d'émission de chaleur d'un câble dans l'air, $W m^{-2} °C^{-5/4}$,	h	heat emission coefficient for a cable in air, $W m^{-2} °C^{-5/4}$,
k	rapport de l'élévation de température au-dessus de l'ambiance de la surface extérieure d'un câble, d'un tuyau ou d'un fourreau à l'élévation de température au-dessus de l'ambiance du conducteur en régime permanent,	k	ratio of cable, pipe or duct external-surface temperature rise above ambient to conductor temperature rise above ambient under steady conditions.
k_1	valeur de k pour un câble d'un groupe,	k_1	value of k for a cable in a group,
p	facteur de Van Wormer pour la répartition de la capacité thermique d'un diélectrique,	p	Van Wormer's factor for apportioning the thermal capacitance of a dielectric,
p'	facteur de Van Wormer pour les revêtements de câbles,	p'	Van Wormer's factor for cable coverings,
p_d	facteur de Van Wormer pour la répartition de la capacité thermique d'un diélectrique lors du calcul du régime transitoire causé par les pertes diélectriques,	p_d	Van Wormer's factor for apportioning thermal capacitance of dielectric when calculating transient caused by dielectric loss,
q_a	rapport $\frac{\text{pertes dans le conducteur} + \text{la gaine} + \text{l'armure}}{\text{pertes dans le conducteur}}$	q_a	$\frac{\text{ratio losses in conductor} + \text{sheath} + \text{armour}}{\text{loss in conductor}}$
q_e	rapport $\frac{\text{pertes dans le conducteur} + \text{pertes dans les conducteurs} + \text{l'écran} + \text{le tuyau}}{\text{pertes dans le conducteur}}$	q_e	$\frac{\text{ratio losses in conductors} + \text{screen} + \text{pipe}}{\text{loss in conductors}}$
q_j	rapport $\frac{\text{pertes dans le conducteur} + \text{pertes dans les conducteurs} + \text{la gaine} + \text{l'armure} + \text{le tuyau}}{\text{pertes dans le conducteur}}$	q_j	$\frac{\text{ratio losses in conductors} + \text{sheath} + \text{armour} + \text{pipe}}{\text{loss in conductors}}$
q_s	rapport $\frac{\text{pertes dans les conducteurs} + \text{pertes dans le conducteur} + \text{la gaine (ou l'écran)}}{\text{pertes dans le conducteur}}$	q_s	$\frac{\text{ratio losses in conductor} + \text{sheath (or screen)}}{\text{loss in conductor}}$
t	temps écoulé depuis le début d'application d'un échauffement, symbole général pour le temps, généralement en secondes (voir aussi T),	t	time from start of application of heating, a general symbol for time, usually in seconds (see also T),
u	rapport $2L/D_e$,	u	ratio $2L / D_e$,
x	durée du palier dans un cycle de charge journalier plafonné à une valeur constante, heures,	x	duration of flat top in a flat-topped daily load cycle, hours,
Φ	fonction tabulée utilisée dans le calcul des facteurs de capacité de transport cyclique,	Φ	tabulated function used for calculating cyclic rating factors,
αR	coefficient de température de la résistivité électrique du matériau conducteur, $°C^{-1}$,	αR	temperature coefficient of electrical resistivity of conductor material, $°C^{-1}$,
$\alpha(t), \beta(t)$	facteurs d'approche pour les élévations de température du conducteur par rapport à la surface du câble, d'une part, de la surface du câble par rapport à l'ambiance d'autre part,	$\alpha(t), \beta(t)$	attainment factors for the conductor to cable surface and cable surface to ambient temperature rises respectively,
$\gamma(t)$	fonction utilisée dans les calculs du facteur de capacité de transport cyclique pour groupes de câbles,	$\gamma(t)$	function used in calculating cyclic rating factor for groups of cables,
δ	diffusivité thermique du sol, $m^2 s^{-1}$,	δ	soil thermal diffusivity, $m^2 sec^{-1}$,
η	teneur en humidité du sol en pourcentage du poids à sec,	η	moisture content of soil in per cent of dry weight,
μ	facteur de charge des pertes d'un cycle de charge,	μ	loss load factor of a load cycle,

ν	fraction du contrat nominal en régime continu tenue pendant $(24-x)$ heures,	ν	<i>fraction of the sustained rated current during $(24-x)$ hours,</i>
ρT	résistivité thermique du sol $^{\circ}\text{C m W}^{-1}$,	ρT	<i>soil thermal resistivity, $^{\circ}\text{C m W}^{-1}$,</i>
$\theta(t)$	élévation de température transitoire du conducteur au-dessus de l'ambiante, sans correction pour variation de la perte dans le conducteur, $^{\circ}\text{C}$,	$\theta(t)$	<i>transient temperature rise of conductor above ambient, without correction for variation in conductor loss, $^{\circ}\text{C}$,</i>
$\theta_c(t)$	élévation de température transitoire du conducteur au-dessus de celle de la surface extérieure d'un câble, $^{\circ}\text{C}$,	$\theta_c(t)$	<i>transient temperature rise of conductor above the outer surface of a cable, $^{\circ}\text{C}$,</i>
$\theta_d(t)$	élévation de température transitoire moyenne dans l'épaisseur du diélectrique au-dessus de celle de la surface extérieure d'un câble, $^{\circ}\text{C}$,	$\theta_d(t)$	<i>transient spatial average temperature rise of dielectric above the outer surface of a cable, $^{\circ}\text{C}$,</i>
$\theta_e(t)$	élévation de température transitoire de la surface extérieure d'un câble (ou du plus chaud des câbles d'un groupe de câbles également chargés) au-dessus de la température ambiante, $^{\circ}\text{C}$,	$\theta_e(t)$	<i>transient temperature rise of outer surface of a cable (or hottest cable in a group of similarly loaded cables) above ambient temperature, $^{\circ}\text{C}$,</i>
$\theta_o(t)$	élévation de température transitoire de l'huile dans un câble en tuyau au-dessus de celle de la surface du tuyau, $^{\circ}\text{C}$,	$\theta_o(t)$	<i>transient average temperature rise of oil in a pipe-type cable above the outer surface of the pipe, $^{\circ}\text{C}$,</i>
$\theta_R(T)$	est égale à $\theta^*(t)$, si l'amplitude de l'échelon de courant est égale au courant nominal en service continu (facteur de charge sans 100 %) et si T exprimé en heures, $^{\circ}\text{C}$,	$\theta_R(T)$	<i>equals $\theta(t)$, when the magnitude of the step function current is the sustained (100 % load factor) rated current, and T is expressed in hours, $^{\circ}\text{C}$,</i>
$\theta_a(t)$	élévation de température transitoire du conducteur au-dessus de l'ambiante, corrigée pour tenir compte de la variation de la perte dans le conducteur, $^{\circ}\text{C}$,	$\theta_a(t)$	<i>conductor transient temperature above ambient, corrected for variation in conductor loss with temperature, $^{\circ}\text{C}$,</i>
$\theta(\infty)$	élévation de température permanente du conducteur au-dessus de l'ambiante, $^{\circ}\text{C}$.	$\theta(\infty)$	<i>conductor steady state temperature rise above ambient, $^{\circ}\text{C}$.</i>

1. — Introduction.

Dans le rapport n° 233 présenté à la CIGRÉ en 1964, une méthode a été donnée pour le calcul des capacités de transport nominales des câbles en régime permanent (facteur de charge 100 %). Le document présent est la première partie d'un rapport traitant des capacités de transport cycliques et de secours d'urgence. Cette partie donne des méthodes pour le calcul des facteurs de charge cyclique et pour celui de la réponse d'un câble à l'application brusque d'un échelon de charge. Il convient d'utiliser également ce dernier calcul lorsqu'il y a lieu de faire intervenir l'effet de la capacité calorifique du câble dans le calcul du facteur de capacité de transport cyclique.

Un critère général utilisé dans les choix a été de donner la préférence à une méthode susceptible de fournir le meilleur compromis possible entre la précision et la simplicité pour un usage quotidien, sans nécessiter l'emploi d'un programme de calcul. Les facteurs de capacité de transport calculés par les méthodes exposées dans le présent document auront en général une précision de $\pm 3\%$. On estime que celle-ci convient à l'exploitation pratique des réseaux d'alimentation en électricité.

1. — Introduction.

In report No. 233 of the 1964 CIGRÉ, a method was given for calculating continuous current ratings of cables (100 % load factor). The present document is Part 1 of a report dealing with cyclic and emergency ratings. This part provides methods for calculating rating factors for cyclic loads and for calculating the response of a cable to a suddenly applied step function load. The latter is also for use when it is necessary to include the effect of cable thermal capacitance in the calculation of a cyclic rating factor.

A general criterion, used for selection, was to prefer a method which gave the best compromise between accuracy and simplicity for every-day use without necessitating the use of a computer program. Rating factors calculated by the methods given in this document will, in general, be accurate within $\pm 3\%$. It is considered that this is adequate for practical supply system operation.

Le Groupe de travail a étudié des méthodes proposées par plusieurs auteurs (en utilisant soit des travaux publiés, soit des communications particulières émanant de membres du Groupe) pour le calcul de la réponse transitoire en température à l'application brusque d'une charge constante, application d'un échelon de pertes), ainsi pour le calcul des facteurs de capacité de transport (à appliquer aux capacités de transport en régime permanent) pour des charges cycliques. Après avoir pris soigneusement en considération les hypothèses physiques et mathématiques adoptées dans chacune des méthodes et après avoir comparé les résultats numériques dans une gamme étendue de types et de tailles de câbles ainsi que de cycles de charge, le Groupe de travail est maintenant en mesure de recommander l'emploi de méthodes appropriées.

La question de la réponse thermique du câble à une variation du courant de charge est traitée au chapitre 2 et des instructions détaillées pour le calcul de la réponse en température d'un type quelconque de câble à un échelon de courant sont données au chapitre 3. Ces premiers chapitres ne servent pas seulement à illustrer, par analogie avec des circuits électriques, les particularités qui gouvernent la réponse en température des câbles, mais ils fournissent également des techniques auxquelles il devient nécessaire de recourir dans les chapitres suivants lorsqu'il faut tenir compte de la capacité calorifique des câbles dans le calcul des capacités de transport cycliques.

Les faits principaux de la Première Partie se trouvent au chapitre 4, qui présente des méthodes de calcul des facteurs de capacité de transport pour des câbles soumis à des cycles de charge journalière. Les subdivisions de ce chapitre traitent de câbles isolés (4.1.) et de circuits de 3 câbles (4.2.) puis de groupes de câbles (4.3.) et de groupes de circuits (4.4). La subdivision (4.5.) donne les critères qui permettent de négliger la capacité calorifique des câbles dans les calculs de facteurs de capacité de transport cyclique. Quand ces critères sont satisfaits, on peut se dispenser de consulter le chapitre 3 du présent document.

On se propose de présenter dans la Deuxième Partie des méthodes permettant le calcul des capacités de transport pour les charges de secours d'urgence. Dans une large mesure ces méthodes seront basées sur les techniques décrites au chapitre 3 de la Première Section.

En général les symboles employés dans le présent document concordent avec ceux de la publication CEI 287, mais il y a quelques cas où la chose n'a pas été possible.

Depuis que le document CIGRE traitant des conditions en régime permanent, ainsi que le document correspondant CEI 287, ont été édités, l'emploi du système d'unités international s'est généralisé et l'attention du lecteur est attirée sur le fait que ce système d'unités est utilisé dans le présent document, contrairement à l'usage qui était fait des unités C.G.S. dans les documents antérieurs.

The Working Group investigated methods proposed by several authors (either from published works or private communication from members of the Group) for calculating the transient temperature response to a suddenly applied constant load (an applied step function of losses), and for calculating rating factors (to be applied to continuous current ratings) for cyclic loads. After careful consideration of the physical and mathematical assumption involved in each method, and after comparing the numerical results for a wide range of cable types and sizes and of load cycles, the Working Group is now able to recommend suitable methods.

The subject of cable thermal response to a change in load current is introduced in Section 2, and detailed instructions for calculating the temperature response of any type of cable to a step function of current are given in Section 3. These early sections not only serve to illustrate, by the use of analogous electrical circuits, the features governing the temperature response of cables, but also provide techniques which are required in later sections where cable thermal capacitance must be taken into account in calculating cyclic ratings.

The principal feature of Part 1 is to be found in Section 4 which sets out methods for calculating rating factors for cables carrying daily cyclic loads. Sub-sections deal with isolated cables (4.1) and circuits of 3 cables (4.2), followed by groups of cables (4.3) and groups of circuits (4.4). Criteria for neglecting cable thermal capacitance in cyclic rating factor calculations are given in Section 4.5. When these are satisfied a reading of Section 3 of the Document may be omitted.

It is intended that Part 2 will contain methods for calculating ratings for emergency loads. To a large extent, these methods will be based on the techniques described in Section 3 of the present Part 1.

In general the symbols in this document are consistent with those of IEC Publication 287, but there are some cases where this is not possible.

Since the CIGRE document dealing with steady state conditions and its parallel document IEC 287 were produced the use of S.I. units has become more general, and the reader's attention is drawn to the use of S.I. units in this present document in distinction to the use of C.G.S. units in the former ones.

2. — Remarques générales sur le choix d'une méthode de calcul de la réponse à un échelon de courant.

Parmi les plus anciennes publications techniques sur le calcul des phénomènes thermiques transitoires dans les câbles enterrés figurent celles de Whitehead, Hutchings (1938) et de Buller (1951); les deux méthodes admettaient, dans le calcul de l'élévation de température de la surface du câble au-dessus de l'ambiante, que le flux de chaleur allant du câble au sol était constant, bien que Buller ait tenu compte dans une certaine mesure de l'insuffisance de cette hypothèse. Neher a publié (1951) une méthode comportant l'emploi d'un calculateur numérique et (1953) une méthode analytique basée sur l'évaluation numérique de l'intégrale de Fourier. Une méthode tenant compte de la capacité calorifique du diélectrique d'une manière empirique, en la répartissant par moitié entre le conducteur et sa gaine, a été indiquée par Jaeger et Newstead (1958), mais elle ne s'applique pas aux câbles à huile fluide.

Morello (1958) a proposé une méthode dans laquelle les régimes transitoires entre le conducteur et la surface du câble, ainsi qu'entre la surface du câble et l'ambiante sont calculés séparément, puis combinés à l'aide de simples coefficients. La conception de cette méthode est simple et elle s'applique à des câbles posés directement dans le sol, à l'air libre ou dans des fourreaux. Lors de la discussion d'un rapport de Neher (1964), dans lequel la méthode utilisant l'intégrale de Fourier était développée plus avant, McGrath (1964) a fait la suggestion d'une approche simplifiée semblable à celle de Morello, en faisant observer que l'erreur engendrée par une technique de ce genre serait du bon côté.

Un rapport récent (Goldenberg (1967 A), Wlodarski et Cabiac (1966)) passant en revue le développement des techniques de calcul des régimes transitoires thermiques des câbles d'énergie enterrés conclut que le coefficient de transfert câble-surface, basé sur un débit constant du flux de chaleur en provenance du câble, est une bonne approximation de la formule exponentielle-intégrale et qu'il convient à la méthode des régimes transitoires partiels donnée par Morello.

Lors de l'examen des différentes méthodes de calcul de la réponse à un échelon, on a considéré qu'une méthode analytique conviendrait mieux à un usage courant qu'une méthode numérique employant les techniques des calculateurs, bien qu'aucune méthode proposée ne soit exacte. Les méthodes analytiques, pour être d'un emploi universel, comportent un certain nombre d'approximations pour le modèle physique sur lequel sont basés les formules.

Deux méthodes numériques (Rudanko, 1964 et Pasqualini, 1968), qui impliquent l'usage de calculateurs, ont également été prises en considération parce que, ne comportant pas autant d'approximations physiques que les méthodes analytiques, elles

2. — General remarks on choice of a method for calculating the response to a step function of current.

Amongst the earliest published techniques for the calculation of thermal transients in buried cables were those of Whitehead-Hutchings (1938) and Buller (1951); both methods assumed that, for the calculation of the cable-surface temperature rise above ambient, the rate of heat flow from the cable into the ground was constant, although Buller also took some account of the deficiency of this assumption. Neher (1951) published a method involving the use of an analogue computer and (1953) an analytical method based on the numerical evaluation of the Fourier integral. A method which made allowance for dielectric thermal capacitance in an empirical manner, by allocating half of it to the conductor and half to the sheath, has been given by Jaeger and Newstead (1958) but is not applicable to oil-filled cables.

Morello (1958) proposed a method where the transients for the conductor to cable-surface and the cable-surface to ambient are calculated separately and then combined by means of simple coefficients. This method is simple in concept and is applicable to cables laid direct in the ground, in free air or in ducts. In the discussion a paper by Neher (1964), where the method using Fourier integrals was developed further, McGrath (1964) suggested a simplified approach which is similar to that of Morello and McGrath noted that the error with such a technique would be on the safe side.

A recent paper (Goldenberg (1967 A) Wlodarski and Cabiac (1966)) surveys the development of techniques for calculating thermal transients for buried power cables and concludes that the cable-surface attainment factor, based on a constant rate of heat flow from the cable, approximates closely to the exponential-integral formula and is relevant to the method of partial transients given by Morello.

When considering the different methods for calculating the response to a step function, it was borne in mind that an analytical method would be more suitable for day to day use than a numerical method using computer techniques, also that no proposed method is exact. Analytical methods, in order to be suitable for general use, involve a number of approximations in the physical model on which the formulæ are based.

Two numerical methods (Rudanko (1964) and Pasqualini (1968)) implying the use of computers have also been considered because, not involving physical approximations to the same extent as the analytical methods, they can in principle achieve

permettent d'atteindre en principe une meilleure précision. Il n'a pas paru raisonnable cependant de considérer ces méthodes comme convenant à un usage courant et elles n'ont été utilisées que comme méthodes de référence, servant à évaluer la précision des différentes méthodes analytiques.

La méthode de calcul de la réponse à un échelon donnée au chapitre 3 est destinée à être employée, dans le chapitre 4, pour le calcul des facteurs de capacité de transport cycliques chaque fois que la capacité calorifique des câbles ne peut pas être négligée et à être utilisée d'une manière qui sera précisée dans la Deuxième Partie où seront traitées des capacités de transport pour secours d'urgence.

Dans les paragraphes 3.2. et 3.3., l'élévation de température due aux pertes diélectriques est supposée s'être stabilisée; en d'autres termes, on a admis que le câble était maintenu depuis longtemps sous tension avant l'application de l'échelon de charge. Le régime transitoire dû à l'application brusque de pertes diélectriques constantes est traité au paragraphe 3.6.

3. — Réponse transitoire à un échelon de courant.

3.1. Méthode recommandée.

La réponse en température d'un câble à un échelon de courant circulant dans son conducteur (ou dans ses conducteurs) dépend de la combinaison des capacités calorifiques et des résistances thermiques des parties constitutives du câble lui-même et de son environnement. A titre d'exemple, dans le cas important de câbles directement posés dans le sol, si la réponse est demandée pour des temps courts, les capacités calorifiques du câble et la façon dont il en est tenu compte jouent un rôle important. La contribution du sol environnant est alors négligeable. Au contraire, quand la réponse est demandée pour des temps longs, les capacités calorifiques associées au câble peuvent être négligeables et le facteur prépondérant est le régime transitoire thermique du sol environnant.

La méthode recommandée pour le calcul de la réponse en température d'un câble à l'application brusque d'une valeur constante du courant au conducteur consiste à considérer que l'ensemble du circuit thermique est divisible en deux parties indépendantes. La première partie se compose des composants du câble situés à l'intérieur de sa surface externe, la seconde partie est l'environnement du câble. Les réponses individuelles de ces deux parties sont des régimes transitoires partiels, à partir desquels on peut reconstituer le régime transitoire du système complet.

La mise en équations de ces deux parties du circuit thermique et des régimes transitoires de température auxquels elles sont soumises est donnée séparément dans les paragraphes suivants, mais on commencera par décrire la méthode permettant de combiner ces régimes transitoires entre eux.

a better accuracy. However, it was not thought reasonable to regard such methods as suitable for every-day use, and they have been used as reference methods only in order to assess the accuracy of the various analytical methods.

The method for calculating the response to a step function, given in Section 3, is intended for use in Section 4 for calculating cyclic rating factors, whenever cable thermal capacitance cannot be neglected, and for use in a manner which will be specified in Part 2 dealing with emergency ratings.

In Sections 3.2 and 3.3, the temperature rise due to dielectric loss has been assumed to have reached a steady state, i.e., the cable has been alive for a long time prior to the application of the step function of load. The transient due to a suddenly applied constant value of dielectric loss is dealt with in Section 3.6.

3. — Transient response to a step function of current.

3.1. Recommended method.

The temperature response of a cable to a step-function of current in its conductor (or conductors) depends on the combination of thermal capacitances and resistances formed by the constituent parts of the cable itself and its surroundings. As an example, in the important case of cables laid directly in the ground, if the response is required for short times the thermal capacitances of the cable, and the way in which these are taken into account, are important. At the same time the contribution of the surrounding soil is negligible. On the other hand, when the response for long times is required, the thermal capacitances associated with the cable may be negligible and the most important factor is the thermal transient in the surrounding soil.

The method recommended for calculating the temperature response of a cable to a suddenly applied constant value of conductor current is to consider that the whole thermal circuit is divisible into two independent parts. One part is made up of the cable components out of the outer surface of the cable, the second part is the environment of the cable. The individual responses of these two parts are partial transients, with which the total transient for the complete system can be built up.

The derivation of these two parts of the thermal circuit and the temperature transients across them are given separately in the sub-sections which follow, but the method for combining the transients will be described first.

La méthode de combinaison, due à Morello (1958), tient compte de la chaleur qui s'accumule dans la première partie du circuit thermique, ce dont résulte une réduction correspondante de la chaleur pénétrant dans la deuxième partie durant le régime transitoire. Ceci se fait en admettant que le rapport

Chaleur émise par la première partie
à l'instant t d'un régime transitoire

Chaleur émise par la première partie
en régime permanent

est égal au rapport

Élévation de température dans la première partie
à l'instant t d'un régime transitoire

Élévation de température dans la première partie
en régime permanent

(Ce dernier rapport est désigné par coefficient de transfert (attainment factor) $\alpha(t)$, de la première partie du circuit thermique.)

Le régime transitoire de température de la deuxième partie du circuit thermique est alors constitué par sa réponse à l'application d'un échelon de chaleur multiplié par un coefficient de réduction (variable dans le temps), égal au coefficient de transfert de la première partie.

Après avoir calculé séparément les deux régimes transitoires partiels, en introduisant dans le second le coefficient de réduction précédent, on obtient le régime transitoire total au-dessus de la température ambiante par une simple addition.

Lorsqu'on effectue des calculs destinés à donner la température atteinte par le conducteur après un temps suffisamment long pour que s'amortisse complètement le régime transitoire de la première partie du circuit thermique, on peut admettre que le coefficient de réduction $\alpha(t)$ est égal à 1. En pratique ceci est valable lorsque le temps écoulé depuis l'apparition du régime transitoire thermique est supérieur :

- (a) Au produit $T \cdot Q$: lorsqu'il s'agit de câbles en tuyau à pression d'huile et de tous les types de câbles sous gaine pour lesquels le produit $T \cdot Q \leq 2$ heures,
- (b) Au produit $2 \cdot T \cdot Q$: lorsqu'il s'agit de câbles en tuyau sous pression gazeuse et de tous les types de câbles sous gaine pour lesquels le produit $T \cdot Q > 2$ heures.

T est la résistance thermique totale et Q la capacité calorifique totale du câble.

Une telle simplification entraîne une erreur sur le régime transitoire de température au-dessus de la surface externe du câble (ou du tuyau) voisine de 5 pour 100 pour les plus grandes tailles de câbles à haute tension. Le tableau suivant, basé sur les critères de spécification couramment appliqués à l'heure actuelle pour déterminer les dimensions des câbles, montre les domaines d'application des cas (a) et (b).

Lorsque le temps considéré est de 12 heures ou plus après l'apparition du régime transitoire, $\alpha(t)$ peut être pris égal à l'unité pour tous les câbles.

The method of combination, due to Morello (1958), makes an allowance for the heat which accumulates in the first part of the thermal circuit and which results in a corresponding reduction in the heat entering the second part during the transient. This is done by assuming that the ratio

*Heat emitted from first part at time t
during a transient*

*Heat emitted from the first part
in the steady state*

is equal to the ratio

*Temperature rise across first part at time t
during a transient*

*Temperature rise across first part
in the steady state*

(This last ratio is known as the attainment factor, $\alpha(t)$, of the first part of the thermal circuit).

Then, the temperature transient of the second part of the thermal circuit is composed of its response to a step function of heat input multiplied by a reduction coefficient (variable in time) equal to the attainment factor of the first part.

After calculating separately the two partial transients, including in the second one the above reduction coefficient, the total transient above ambient temperature is obtained by simple addition.

When the calculations are required to give the conductor temperature occurring after a period long enough to complete the transient in the first part of the thermal circuit, then the reduction coefficient $\alpha(t)$ may be assumed to be equal to 1. In practice this applies when the period from the initiation of the thermal transient is longer than :

- (a) The product $T \cdot Q$: when dealing with oil-pressure pipe-type cables and all types of self-contained cables where the product $T \cdot Q \leq 2$ hours, and*
- (b) The product $2 \cdot T \cdot Q$: when dealing with gas-pressure pipe-type cables and all types of self-contained cables where the product $T \cdot Q > 2$ hours.*

T is the total thermal resistance and Q the total thermal capacitance of the cable.

Such simplification involves an error in the conductor temperature transient above the outside surface of the cable (or pipe) approaching 5 per cent for the largest sizes of high-voltage cable. The following table, based on design criteria at present commonly used to determine dimensions of cables, shows when case (a) and when case (b) apply.

Where the time being considered is 12 hours or more after the initiation of the transient then $\alpha(t)$ may be taken as unity for all cables.

Type de câble Type of Cable	Cas (a) Case (a)	Cas (b) Case (b)
A huile fluide Oil-filled	α) Toutes tensions < 220 kV All voltages < 220 kV β) 220 kV : sections ≤ 150 mm ² 220 kV : sections ≤ 150 mm ²	α) 220 kV : sections > 150 mm ² 220 kV : sections > 150 mm ² β) Toutes tensions > 220 kV, jusqu'à 400 kV All voltages > 220 kV, up to 400 kV
En tuyau à pression d'huile Pipe type, oil pressure	α) Toutes tensions < 220 kV All voltages < 220 kV β) 220 kV sections ≤ 800 mm ² 220 kV sections ≤ 800 mm ²	α) 220 kV sections > 800 mm ² 220 kV sections > 800 mm ² β) Toutes tensions > 220 kV, jusqu'à 400 kV all voltages > 220 kV, up to 400 kV
En tuyau à pression de gaz Pipe type, gas pressure		α) ≤ 220 kV β) Sections ≤ 1 000 mm ² Sections ≤ 1 000 mm ²
Au polyéthylène Polyethylene	α) Toutes tensions < 60 kV All voltages < 60 kV β) 60 kV : sections ≤ 150 mm ² 60 kV : sections ≤ 150 mm ²	α) 60 kV : sections > 150 mm ² 60 kV : sections > 150 mm ² β) 110 kV

3.2. Réponse des circuits représentant le câble.

3.2. Response of circuits representing the cable.

3.1.2. Consistance de la première partie du circuit thermique.

3.2.1. Extent of first part of thermal circuit.

Pour les besoins du présent rapport, le câble, c'est-à-dire la première partie du circuit thermique, doit être défini pour chaque type d'installation, à savoir les suivantes :

For the purpose of this report, the cable or first part of the thermal circuit must be defined for each type of installation to include the following :

- (a) Câbles enterrés directement dans le sol.
Le câble complet y compris son revêtement extérieur ou sa protection contre la corrosion. Pour les câbles en tuyau, cela comprend le tuyau et son rubanage de protection.
- (b) Câbles en fourreaux.
Le câble, le fourreau et toute matière de remplissage du fourreau. Pour les fourreaux noyés dans du béton, le circuit de câble comprend le fourreau proprement dit (le béton doit, de même que le sol, être considéré comme appartenant à la deuxième partie du circuit thermique). Dans le cas de fourreaux formés directement en coulant du béton, le mode de traitement est le même, mais la capacité calorifique du fourreau, Q_d , est nulle.
- (c) Câbles posés à l'air libre.
Le câble complet y compris son revêtement extérieur.

- (a) Cables buried directly in soil.
The complete cable including its outermost serving or anticorrosion protection. For pipe-type cables this includes the pipe and its protective wrappings.
- (b) Cables in ducts :
The cable, the duct and whatever fills the duct-space. For ducts embedded in concrete, the cable circuit includes the duct itself. (The concrete is to be considered, with the soil, as belonging to the second part of the thermal circuit). For ducts formed directly by casting concrete, the treatment is the same but the thermal capacity of the duct, Q_d , is zero.
- (c) Cables in air :
The complete cable including its outermost covering.

Les régimes transitoires de température calculés pour la première partie du circuit thermique donnent l'élévation de température du conducteur par rapport à celle de la surface extérieure du câble, telle qu'elle est définie ci-dessus.

Temperature transient calculated for the first part of the thermal circuit will give the temperature rise of the conductor with respect to the outermost surface of the cable as defined above.

Le câble est représenté par des circuits à constantes localisées, dont la détermination est importante, et les méthodes données dans le présent document doivent être suivies si l'on veut obtenir des résultats uniformes chez les différents utilisateurs. Ceci s'applique en particulier aux câbles de structure complexe pour lesquels, afin de rendre les

The cable is represented by circuits with lumped constants, the derivation of which is important and the methods given in this document must be followed if uniform results between users are to be obtained. This applies particularly to cables having complex constructions and where, in order to make calculation reasonably convenient, the cable circuit

calculs suffisamment commodes, le circuit du câble a été simplifié en le ramenant à un nombre d'éléments aussi réduits que possible.

Il convient de noter que, dans un câble, toutes les résistances thermiques, capacités calorifiques et pertes doivent être calculées comme des grandeurs ramenées à un conducteur, ou au conducteur équivalent dans le cas de câbles multipolaires (voir paragraphe 3.2.2.).

3.2.2. Représentation du diélectrique.

Il est nécessaire de représenter le diélectrique par des constantes thermiques localisées. A cet effet, la capacité calorifique totale du diélectrique Q_i est répartie entre les positions du conducteur et de la gaine suivant une méthode donnée par Van Wormer (1955). Celle-ci suppose une distribution de températures logarithmique dans l'épaisseur du diélectrique pendant le régime transitoire, comme en régime permanent, puis elle répartit la capacité calorifique du diélectrique entre les deux positions de telle façon que la chaleur totale emmagasinée dans le diélectrique demeure inchangée.

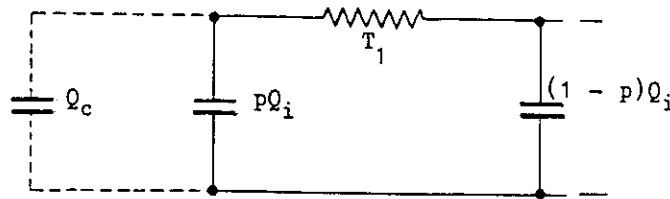


FIG. 1.

Illustration de la représentation du diélectrique par la technique de Van Wormer.

Illustration of the representation of the dielectric by Van Wormer's technique.

Le diélectrique est alors représenté par les éléments indiqués en trait plein sur la figure 1.

The dielectric is then represented by the components shown in full lines in Fig. 1.

$$p = \frac{1}{2 \ln\left(\frac{D_i}{d_c}\right)} - \frac{1}{\left(\frac{D_i}{d_c}\right)^2 - 1} \quad (3.1.)$$

où

T_1 = résistance thermique totale du diélectrique par conducteur (ou pour le conducteur équivalent avec un câble multipolaire).

Q_i = capacité calorifique totale du diélectrique par conducteur (ou pour le conducteur équivalent avec un câble multipolaire).

D_i = diamètre extérieur du diélectrique.

Q_c = capacité calorifique du conducteur.

d_c = diamètre intérieur du diélectrique.

where

T_1 = total thermal resistance of dielectric per conductor (or equivalent conductor in multi-core cable),

Q_i = total thermal capacitance of dielectric per conductor (or equivalent conductor in multi-core cable),

D_i = outer diameter of dielectric,

Q_c = thermal capacitance of conductor,

d_c = inner diameter of dielectric.

Nota : Du point de vue thermique, l'épaisseur du diélectrique comprend toutes les couches non métalliques semi-conductrices placées, soit sur le conducteur, soit sur l'isolant.

Note : From the thermal point of view the thickness of the dielectric includes any non-metallic semi-conducting layers either on the conductor or on the insulation.

Pour les câbles multipolaires, une méthode suggérée par Wollaston (1949) est proposée à titre d'essai. Dans cette méthode le câble multipolaire est remplacé par une structure équivalente unipolaire dissipant au total les mêmes pertes Joule. Le conducteur unique équivalent a un diamètre

$$d_c = D_i e^{-\frac{2\pi T_1}{p_i}}$$

où D_i a pour valeur celle du diamètre extérieur du diélectrique (sous la gaine) du câble multipolaire et T_1 est la résistance thermique du câble équivalent unipolaire. T_1 est égale au tiers de la valeur de celle d'une des phases du câble multipolaire telle qu'elle est donnée par la Publication 287, paragraphes 8.1.2 et 8.1.4 (CEI, 1969).

Les capacités calorifiques sont calculées avec les hypothèses suivantes :

- les conducteurs réels sont considérés comme étant complètement situés à l'intérieur du diamètre du conducteur unique équivalent, le reste du conducteur équivalent étant occupé par l'isolation.
- L'espace entre le conducteur équivalent et la gaine est considéré comme complètement occupé par l'isolation (pour les câbles à huile fluide, cet espace est en partie rempli par le volume d'huile total inclus dans les canaux, le reste étant du papier imprégné d'huile).

Le facteur p est calculé en utilisant les dimensions du câble équivalent et est appliqué à la capacité calorifique de l'isolation basée sur l'hypothèse (b) ci-dessus.

Pour des régimes transitoires de très courte durée (en général 1 heure ou moins), ces méthodes ne conviennent pas et cette question sera traitée sous la rubrique des capacités de transport de secours d'urgence dans la Deuxième Partie.

3.2.3. Représentation des câbles de types divers.

La première partie du circuit thermique qui simule le câble est toujours représentée par un réseau à deux cellules, dont la détermination est indiquée ci-après pour les types les plus courants de câbles et d'installations.

Le réseau est reproduit ci-dessous :

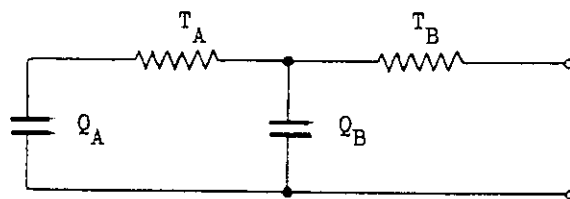


FIG. 2.

Réseau équivalent à la capacité calorifique et à la résistance thermique d'un câble.

Network equivalent to cable thermal capacitance and resistance.

For multi-core cables a method suggested by Wollaston (1949) is tentatively proposed. In this method the multi-core cable is replaced by an equivalent single-core construction dissipating the same total conductor losses. The equivalent single conductor has a diameter

where D_i is the same value of diameter over dielectric (under the sheath) as for the multi-core cable and T_1 is the thermal resistance of the equivalent single-core cable. T_1 is one third of the value for one of the cores of the multi-core cable as given in Publication 287, Sections 8.1.2. to 8.1.4 (IEC, 1969).

Thermal capacitances are calculated on the following assumptions :

- the actual conductors are considered to be completely inside the diameter of the equivalent single-conductor, the remainder of the equivalent conductor being occupied by insulation.
- the space between the equivalent conductor and the sheath is considered to be completely occupied by insulation (for oil-filled cables this space is filled partly by the total volume of oil in the ducts and the remainder is oil impregnated paper).

The factor p is then calculated using the dimensions of the equivalent cable and is applied to the thermal capacitance of the insulation based on assumption (b) above.

For very short duration transients (in general 1 hour or less) these methods are not suitable, and this matter will be dealt with under the heading of emergency ratings in Part 2.

3.2.3. Representation of cables of various types.

The first part of the thermal circuit simulates the cable, and is always represented by a two-section network, the derivation of which is given here for the more common types of cable and installation.

The network is as follows :

Les valeurs des composants sont données ci-après :
 (a) Câble à isolation solide, à huile fluide et autres structures analogues du point de vue thermique.

and the value of the components are given below :
 (a) Solid type, oil-filled and thermally similar constructions

$$T_A = T_1 \quad (3-2)$$

$$T_B = q_s T_3 \quad (3-3)$$

$$Q_A = Q_c + p Q_i \quad (3-4)$$

$$Q_B = (1 - p) Q_i + \frac{Q_s + p' Q_i}{q_s} \quad (3-5)$$

T_1 , Q_i et p étant définis au paragraphe 3.2.2.

T_1 , Q_i and p are defined in Section 3.2.2.

T_1 = résistance thermique du revêtement extérieur,

T_1 = thermal resistance of outer covering,

Q_c = capacité thermique du conducteur ou du conducteur équivalent,

Q_c = thermal capacitance of conductor or equivalent conductor,

Q_s = capacité calorifique de la gaine et du freinage,

Q_s = thermal capacitance of sheath and reinforcement,

Q_i = capacité calorifique du revêtement extérieur,

Q_i = thermal capacitance of outer covering,

q_s = rapport $\frac{\text{pertes (conducteur + gaine)}}{\text{pertes conducteur}}$

q_s = $\frac{\text{ratio losses (conductor + sheath)}}{\text{losses in conductor}}$

il sert à tenir compte des pertes supplémentaires se produisant dans la gaine. Dans les câbles multipolaires le conducteur est le conducteur équivalent.

and is used to take account of the extra losses occurring at the sheath. In multi-core cables the conductor is the equivalent conductor.

p' est un facteur utilisé pour répartir la capacité calorifique du revêtement extérieur de manière analogue à celle utilisée pour le diélectrique.

p' is a factor used to allocate the thermal capacitance of the outer covering in a similar manner to that used for the dielectric.

$$p' = \frac{1}{2 \ln \left(\frac{D_e}{D_i} \right)} - \frac{1}{\left(\frac{D_e}{D_i} \right)^2 - 1} \quad (3-6)$$

D_e et D_i sont les diamètres extérieur et intérieur du revêtement.

D_e and D_i are the outer and inner diameters of the covering.

Nota : La partie extérieure de la capacité calorifique du revêtement a été négligée car il a été vérifié qu'elle ne jouait qu'un rôle insignifiant dans la détermination du régime transitoire de température du conducteur.

Note : The outer part of the thermal capacitance of the covering is omitted because it has been found to play only an insignificant part in determining the conductor temperature transient.

(b) Câbles en tuyau (à remplissage d'huile).

(b) Pipe-type cables (oil-filled).

$$T_A = T_1 + \frac{1}{2} q_s T_o \quad (3-7)$$

$$T_B = \frac{1}{2} q_s T_o + q_s T_3 \quad (3-8)$$

$$Q_A = Q_c + p Q_i \quad (3-9)$$

$$Q_B = (1 - p) Q_i + \frac{Q_o}{q_s} \quad (3-10)$$

T_1 , Q_i et p sont définis au paragraphe 3.2.2.

T_1 , Q_i and p are defined in Section 3.2.2.

q_s = $\frac{\text{pertes dans (le conducteur et l'écran)}}{\text{pertes dans le conducteur}}$

q_s = $\frac{\text{losses in (conductor and screen)}}{\text{losses in conductor}}$

T_o = résistance thermique de l'huile dans le tuyau,

T_o = the thermal resistance of the oil in the pipe,

T_3 = résistance thermique du revêtement du tuyau,

Q_0 = capacité calorifique de l'huile dans le tuyau,

q_e = rapport $\frac{\text{pertes dans le conducteur} + \text{l'écran} + \text{le tuyau}}{\text{pertes dans le conducteur}}$

il est utilisé pour tenir compte des pertes supplémentaires se produisant dans le tuyau.

(c) Câbles en tuyau (à pression de gaz, câbles posés remplis et armés).

T_3 = thermal resistance of covering on pipe,

Q_0 = the thermal capacitance of the oil in the pipe,

q_e = $\frac{\text{the ratio losses in conductor} + \text{screen} + \text{pipe}}{\text{losses in conductor}}$

and is used to take account of the extra losses occurring in the pipe.

(c) Pipe-type cables (gas pressure, cables laid up filled and armoured).

$$T_A = T_1 \quad (3-11)$$

$$T_B = q_s T_f + q_a T_2 + q_j T_3 \quad (3-12)$$

$$Q_A = Q_c + pQ_i \quad (3-13)$$

$$Q_B = (1 - p)Q_i + \frac{Q_s + Q_f}{q_s} + \frac{Q_a}{q_a} + \frac{0.5 Q_p}{q_j} \quad (3-14)$$

avec

with

$$q_a = \frac{\text{pertes dans (le conducteur} + \text{la gaine} + \text{l'armure)}}{\text{pertes dans le conducteur}}$$

$$q_a = \frac{\text{losses in (conductor} + \text{sheath} + \text{armour)}}{\text{losses in conductor}}$$

$$q_j = \frac{\text{pertes dans le conducteur}}{\text{pertes dans (le conducteur} + \text{la gaine} + \text{l'armure} + \text{le tuyau)}}$$

$$q_j = \frac{\text{losses in (conductor} + \text{sheath} + \text{armour} + \text{pipe)}}{\text{losses in conductor}}$$

T_2 = résistance thermique du gaz dans le tuyau,

Q_a = capacité calorifique de l'armure,

Q_f = capacité calorifique du bourrage,

Q_p = capacité calorifique du tuyau.

T_2 = thermal resistance of gas in the pipe,

Q_a = thermal capacitance of armour,

Q_f = thermal capacitance of filling,

Q_p = thermal capacitance of pipe.

(d) Câble en tuyau (à pression de gaz, sans bourrage ni armure).

(d) Pipe-type cables (gas pressure, no filling material or armour).

$$T_A = T_1 \quad (3-15)$$

$$T_B = q_s T_2 + q_e T_3 \quad (3-16)$$

$$Q_A = Q_c + pQ_i \quad (3-17)$$

$$Q_B = (1 - p)Q_i + \frac{Q_s}{q_s} + \frac{0.5 Q_p}{q_e} \quad (3-18)$$

$$q_e = \frac{\text{pertes dans (le conducteur} + \text{la gaine} + \text{le tuyau)}}{\text{pertes dans le conducteur}}$$

$$q_e = \frac{\text{losses in (conductor} + \text{sheath} + \text{pipe)}}{\text{losses in conductor}}$$

(e) Câbles en fourreau.

e) Cables in ducts.

$$T_A = T_1 \quad (3-19)$$

$$T_B = q_s (T_3 + T_4' + T_4'') \quad (3-20)$$

$$Q_A = Q_c + pQ_i \quad (3-21)$$

$$Q_B = (1 - p)Q_i + \frac{Q_s + Q_j + 0.5 Q_d}{q_s} \quad (3-22)$$

où

where

T_1' = résistance thermique du fourreau,

Q_d = capacité calorifique du fourreau,

T_4' = résistance thermique de l'espace d'air dans le fourreau.

T_4' = the thermal resistance of the duct,

Q_d = the thermal capacitance of the duct,

T_4' = the thermal resistance of the air space in the duct.

f) Câbles triplomb.

(f) S.L. type cables.

$$T_A = T_1 \quad (3-23)$$

$$T_B = q_s T_f + q_a T_3 \quad (3-24)$$

$$Q_A = Q_c + p Q_i \quad (3-25)$$

$$Q_B = (1 - p) Q_i + \frac{Q_f + 0.5 Q_f}{q_s} + \left(\frac{q_a T_3}{q_s T_2 + q_a T_3} \right)^2 \left(\frac{0.5 Q_f}{q_s} + \frac{Q_a + Q_i}{q_a} \right) \quad (3-26)$$

avec

T_f = résistance thermique des bourrages,

Q_f = capacité calorifique des bourrages,

Q_a = capacité calorifique de l'armure.

where

T_f = thermal resistance of filling,

Q_f = thermal capacitance of filling,

Q_a = thermal capacitance of armour.

3.2.4. Calcul de la réponse d'un circuit de câble.

3.2.4. Calculation of response of cable circuit.

La réponse transitoire de ces circuits de câble à un échelon de courant de charge, considérés isolément, c'est-à-dire avec la paire de bornes de droite de la figure 2 mise en court-circuit, s'obtient de la façon suivante :

The transient response of these cable circuits to a step function of load current, considered in isolation, that is with the right-hand pair of terminals in Figure 2 short circuited, is found as follows :

soit

Let

$$M_0 = \frac{1}{2} (Q_A (T_A + T_B) + Q_B T_B) \quad (3-27)$$

$$N_0 = Q_A T_A Q_B T_B \quad (3-28)$$

et

and

$$a = \frac{M_0 + \sqrt{M_0^2 - N_0}}{N_0} \quad (3-29)$$

$$b = \frac{M_0 - \sqrt{M_0^2 - N_0}}{N_0} \quad (3-30)$$

donc

then

$$T_a = \frac{1}{a - b} \left[\frac{1}{Q_A} - b(T_A + T_B) \right] \quad (3-31)$$

$$T_b = T_A + T_B - T_a \quad (3-32)$$

et l'élévation de température transitoire $\theta_c(t)$ du conducteur au-dessus de celle de la surface extérieure du câble (voir paragraphe 3.2.1) est :

and the transient temperature rise, $\theta_c(t)$, of the conductor above the outer surface of the cable (see Section 3.2.1) is :

$$\theta_c(t) = W_c [T_a (1 - e^{-at}) + T_b (1 - e^{-bt})] \quad (3-33)$$

où W_c représente les pertes linéiques dans un conducteur réel ou dans un conducteur équivalent basée sur la température de conducteur maximale atteinte. On suppose ces pertes constantes pendant le régime transitoire.

where W_c is the power loss per unit length in a conductor or an equivalent conductor based on the maximum conductor temperature attained. The power loss is assumed to be constant during the transient.

En outre

Further,

$$\alpha(t) = \theta_c(t) / [W_c (T_A + T_B)] \quad (3-34)$$

3.2.5. Représentation de câbles et d'installations de types non spécifiés dans les paragraphes précédents.

3.2.5. Representation of cables and installations of types not specified in foregoing sections.

Les paragraphes précédents fournissent des circuits correspondant à la plupart des types de câbles.

The previous sections provide circuits for most cable types. However, to cover contingencies the

Néanmoins, afin de faire face aux imprévus, la méthode suivante est recommandée pour les cas qui ne sont pas traités spécifiquement dans le rapport.

- (a) Construire un réseau en JC représentant les résistances thermiques et capacités calorifiques du câble. A cet effet le câble doit être considéré comme s'étendant jusqu'à la surface intérieure du sol pour les câbles enterrés et jusqu'à l'air libre pour les câbles posés à l'air.

Les résistances thermiques sont calculées par les méthodes utilisées pour la détermination des capacités de transport en régime permanent (CIGRE, 1964; CEI, 1969).

Les capacités calorifiques des parties métalliques sont représentées par des grandeurs localisées correspondant à leur emplacement physique dans le câble. La capacité calorifique des matériaux de haute résistivité thermique (par exemple l'isolation et les revêtements) est répartie selon la technique de Van Wormer décrite au paragraphe 3.2.2 (par exemple comme pour le revêtement au paragraphe 3.2.3 a). Il est important que le diélectrique soit traité exactement de la manière spécifiée au paragraphe 3.2.2.

- (b) Le réseau comprendra sans doute plus de deux cellules et il doit, pour permettre de trouver la solution, être réduit au schéma à deux cellules représenté par la figure 2. Quand le circuit thermique d'un câble ne peut pas être facilement réduit à ces deux cellules, la seconde cellule et les suivantes doivent être combinées en une seule, en employant la méthode donnée en Annexe I. Il est extrêmement important que la première cellule conserve la forme originale décrite au paragraphe 3.2.2.

3.3. Réponse de l'environnement du câble (deuxième partie du circuit thermique).

3.3.1. Câbles enterrés.

La réponse transitoire de l'environnement du câble se calcule à l'aide de la fonction exponentielle intégrale qui est l'équivalent direct en régime transitoire de la procédure adoptée pour le régime permanent (CIGRE, 1964; CEI, 1969) d'un groupe de câbles séparés.

L'élévation de température transitoire, $\theta_p(t)$, de la surface extérieure du câble le plus chaud d'un groupe de câbles également chargés est :

$$\theta_p(t) = \alpha(t) \frac{\rho_T W_I}{4\pi} \left\{ \left[-E_i \left(\frac{-D_s^2}{16 t \delta} \right) + Ei \left(\frac{-L^2}{t \delta} \right) \right] + \sum_{k=1}^{N-1} \left[-Ei \left(\frac{-(d_{pk})^2}{4 t \delta} \right) + Ei \left(\frac{-(d'_{pk})^2}{4 t \delta} \right) \right] \right\} \quad (3-35)$$

où

W_I = perte de puissance totale par unité de longueur de chaque câble du groupe,

— $Ei(-x)$ = fonction exponentielle intégrale définie en Annexe II,

following method is recommended for cases not specifically dealt with in the report.

- (a) Build up a ladder network representing the thermal resistances and capacitances of the cable. For this purpose the cable should be considered to extend as far as the inner surface of the soil for buried cables, and to free air for cables in air.

Thermal resistances are calculated by the methods used to determine the steady-state ratings. (CIGRE, 1964; IEC, 1969).

Thermal capacitances of metallic parts are placed as lumped quantities corresponding to their physical position in the cable. The thermal capacitance of materials with a high thermal resistivity (e.g., insulation and coverings) is allocated by the Van Wormer technique described in Section 3.2.2. (e.g., the covering in Section 3.2.3.a). It is important that the dielectric be treated exactly as specified in Section 3.2.2.

- (b) This network will probably contain more than two sections and for solution must be reduced to the two section form shown in Figure 2. Where the thermal circuit of a cable is not easily reduced to two sections, then the second and subsequent sections are combined into one, using the method given in Appendix I. It is most important that the first section is left in the original form as derived in Section 3.2.2.

3.3. Response of cable environment (second part of thermal circuit).

3.3.1. Buried cables.

The transient response of the cable environment is calculated by an exponential integral formula which is the direct transient equivalent of the steady-state procedure adopted in (CIGRE, 1964; IEC, 1969), for groups of separate cables.

The transient temperature rise, $\theta_p(t)$, of the outer surface of the hottest cable of a group of cables, and similarly loaded, is :

where

W_I = the total power loss per unit length of each cable in the group,

— $Ei(-x)$ = the exponential integral function defined in Appendix II,

$\alpha(t) =$	coefficient de transfert du conducteur à la surface du câble (paragraphe 3.2.4),
$\rho T =$	résistivité thermique du sol,
$D_e =$	diamètre de la surface extérieure du câble,
$\delta =$	diffusivité thermique du sol,
$t =$	temps écoulé depuis l'instant d'application de l'échauffement,
$L =$	profondeur axiale d'enterrement du câble le plus chaud,
$d_{pk} =$	distance du centre du câble k au centre du câble le plus chaud p .
$d'_{pk} =$	distance de l'image du centre du câble k au centre du câble le plus chaud p .
$N =$	nombre de câbles.

La sommation s'étend à tous les câbles du groupe à l'exception du plus chaud et ce terme est supprimé si l'on ne considère qu'un câble unique.

Cette formule sera simplifiée pour les capacités de transport cycliques au paragraphe 4.3.

3.3.2. Câbles posés à l'air libre.

La formule proposée (Morello, 1958) pour l'élévation de température transitoire, $\theta_e(t)$, de la surface extérieure d'un câble au-dessus de la température de l'air ambiant est :

$$\theta_e(t) = \left[\left(\frac{W_f}{\pi D_e h} \right) \cdot \alpha(t) \right]^{4/5} \quad (3-36)$$

où

$h =$ coefficient de dissipation de chaleur extérieure pour la surface du câble dans l'air, voir figure 6 (reproduite d'après CIGRE, 1964; CEI, 1969),

$\alpha(t) =$ coefficient de transfert du circuit thermique intérieur du câble. Voir paragraphe 3.2.4.

L'échauffement mutuel, pratiquement instantané, de groupes de câbles posés dans l'air, est pris en compte dans le coefficient h .

3.4. Calcul du régime de température transitoire complet (depuis le conducteur jusqu'à la température ambiante).

Le régime de température transitoire complet, $\theta(t)$, du conducteur au-dessus de la température ambiante est :

$$\theta(t) = \theta_c(t) + \theta_e(t) \quad (3-37)$$

3.5. Correction à la réponse transitoire pour tenir compte de la variation des pertes dans le conducteur avec la température.

La variation de résistance du conducteur avec la température pendant le régime transitoire a pour

$\alpha(t) =$ conductor to cable surface attainment factor (Section 3.2.4.),

$\rho T =$ soil thermal resistivity,

$D_e =$ external surface diameter of cable,

$\delta =$ soil thermal diffusivity,

$t =$ time from moment of application of heating,

$L =$ axial depth of burial of hottest cable,

$d_{pk} =$ distance from centre of cable k to centre of hottest cable p ,

$d'_{pk} =$ distance from image of centre of cable k to the centre of hottest cable p ,

$N =$ number of cables.

The summation extends over all the cables in the group except the hottest, and this term is not needed if only a single cable is being considered.

This formula has been simplified for cyclic rating purposes in Section 4.3.

3.3.2. Cables in air.

The proposed formula (Morello, 1958) for the transient temperature rise, $\theta_e(t)$, of the outer surface of a cable above the ambient air temperature is :

where :

$h =$ the external heat dissipation coefficient for the surface of the cable in air, see Figure 6 (reproduced from CIGRE, 1964; IEC, 1969),

$\alpha(t) =$ the attainment factor of the internal thermal circuit of the cable. See Section 3.2.4.

The mutual heating, which is practically instantaneous, of groups of cables in air, is taken account of in the coefficient h .

3.4. Calculation of complete temperature transient (conductor to ambient temperature).

The complete temperature transient, $\theta(t)$, of the conductor above the ambient temperature is :

3.5. Correction to transient response for variation in conductor losses with temperature.

The change in conductor resistance with temperature during the transient results in the conductor

conséquence une variation des pertes du conducteur avec le temps (Goldenberg, 1967 B). En tenant compte de la variation des pertes du conducteur avec la température on obtient l'élévation de température corrigée.

$$\theta_{\alpha}(t) = \frac{\theta(t)}{1 + \alpha_R (\theta(\infty) - \theta(t))} \quad (3-38)$$

où

$\theta(t)$ est l'élévation transitoire de température au-dessus de l'ambiante du conducteur sans correction pour variation des pertes du conducteur, basée sur la résistance du conducteur à la fin du régime transitoire.

$\theta(\infty)$ est l'élévation de température du conducteur au-dessus de l'ambiante en régime permanent.

α_R est le coefficient de température de la résistivité électrique du matériau du conducteur au début du régime transitoire.

3.6. Régime transitoire causé par l'application brusque de la tension (régime transitoire dû aux pertes diélectriques).

Dans les précédents paragraphes 3.2 et 3.3 on a supposé que l'élévation de température du conducteur due aux pertes diélectriques avait atteint son état stationnaire et que la température totale à un instant quelconque du régime transitoire pouvait s'obtenir par simple addition de l'échauffement constant dû aux pertes diélectriques et de l'échauffement transitoire dû au courant de charge.

Si l'application du courant de charge et de la tension du réseau ont lieu simultanément, il faut calculer l'élévation transitoire de température additionnelle due aux pertes diélectriques (Morello, 1958).

3.6.1. Câbles pour tensions inférieures ou égales à 275 kV.

Dans ce cas il suffit d'admettre que la moitié des pertes diélectriques est produite au niveau du conducteur et l'autre moitié au niveau de l'écran sur isolant. Le circuit thermique du câble s'obtient par la méthode donnée au paragraphe 3.2, c'est-à-dire que le coefficient p attribuant au conducteur une fraction de la capacité calorifique du diélectrique est le même que pour les pertes dans le conducteur. Par rapport au régime transitoire dû aux pertes dans le conducteur, les seules différences sont que les pertes diélectriques partant du conducteur sont égales à $1/2 W_d$ partant du conducteur et que les coefficients q_s , q_c , q_a et q_j sont toujours égaux à 2.

3.6.2. Câbles pour tensions supérieures à 275 kV.

Dans ce cas les pertes diélectriques représentent une fraction importante des pertes totales et l'on ne doit pas utiliser la méthode décrite en 3.6.1.

L'erreur est due à la distribution particulière des pertes à l'intérieur du diélectrique; une méthode

losses being variable with time (Goldenberg, 1967B). Allowance for the variation of conductor loss with temperature gives the corrected temperature rise:

where

$\theta(t)$ is the conductor transient temperature rise above ambient without correction for variation in conductor loss, and is based on the conductor resistance at the end of the transient.

$\theta(\infty)$ is the conductor steady state temperature rise above ambient.

α_R is the temperature coefficient of electrical resistivity of the conductor material at the commencement of the transient.

3.6. Transient caused by sudden application of voltage (transient due to dielectric loss).

In the preceding sections 3.2 and 3.3 it has been assumed that the temperature rise of the conductor due to the dielectric loss has reached its steady state, and that the total temperature at any time during the transient can be obtained simply by adding the constant rise due to the dielectric loss to the transient value due to the load current.

If the application of load current and system voltage occur at the same time, then an additional transient temperature rise due to the dielectric loss must be calculated (Morello, 1958).

3.6.1. Cables at voltages up to and including 275 kV.

In this case it is sufficient to assume that half the dielectric loss is produced at the conductor and the other half at the core-screen of sheath. The cable thermal circuit is derived by the method given in Section 3.2., i.e., the coefficient p apportioning to the conductor a fraction of the dielectric thermal capacitance is the same as in the case of the conductor loss. In comparison with the transient due to conductor loss, the only differences are that a dielectric loss of $1/2 W_d$ starts from the conductor, and that the coefficients q_s , q_c , q_a and q_j are always equal to 2.

3.6.2. Cables at voltages higher than 275 kV.

In this case the dielectric loss is an important fraction of the total loss, and the method described in 3.6.1 should not be used.

The error is due to the particular distribution of losses inside the dielectric, so that a correct method

correcte doit donc employer un circuit thermique équivalent différent de celui donné au paragraphe 3.2. Le coefficient p , servant à répartir la capacité calorifique du diélectrique entre le conducteur et la gaine, doit être remplacé par :

$$p_d = \frac{\left[\left(\frac{D_i}{d_c} \right)^2 \ln \frac{D_i}{d_c} \right] - \left[\ln \frac{D_i}{d_c} \right]^2 - \frac{1}{2} \left[\left(\frac{D_i}{d_c} \right)^2 - 1 \right]}{\left[\left(\frac{D_i}{d_c} \right)^2 - 1 \right] \left[\ln \frac{D_i}{d_c} \right]^2} \quad (3-39)$$

où D_i et d_c sont les diamètres extérieur et intérieur du diélectrique.

La fraction des pertes diélectriques partant du conducteur est toujours prise égale à $1/2 W_d$ et les coefficients q_s , q_r , q_a et q_j sont égaux à 2.

3.7. Variation de température moyenne transitoire à travers le diélectrique ou à travers l'huile de remplissage des tuyaux.

La variation transitoire de pression d'huile des câbles à huile fluide peut se calculer à partir des variations de la température moyenne du diélectrique et de la température du conducteur; des formules pour le calcul de l'élévation de température moyenne transitoire (Morello, 1958) sont données ci-après au paragraphe 3.7.1.

Pour des câbles oléostatiques, il est nécessaire de connaître la variation de la température moyenne de l'huile logée entre les câbles et le tuyau. La variation de température à calculer est celle qui se produit, non pas dans le diélectrique, mais à l'extérieur de celui-ci. Le paragraphe 3.7.2. donne des formules pour le calcul de la température moyenne de l'huile.

Pour des régimes transitoires de très courte durée (en général 1 heure ou moins) ces méthodes ne conviennent pas et cette question sera traitée dans la deuxième partie sous la rubrique des capacités de transport de secours d'urgence.

3.7.1. Câbles à huile fluide.

- (a) Causée par les pertes dans le conducteur, l'élévation de température moyenne spatiale transitoire au-dessus de la température de la surface extérieure du câble est :

$$\theta_d(t) = W_c [T'_a (1 - e^{-at}) + T'_b (1 - e^{-bt})] \quad (3-40)$$

Cette formule est semblable à celle donnée au paragraphe 3.2.4, la seule différence résidant dans l'utilisation des résistances thermiques T'_a et T'_b au lieu de T_a et T_b . Les valeurs de T'_a et T'_b sont :

$$T'_a = \frac{1}{a - b} \left[\frac{p}{Q_A} - b(pT_A + T_B) \right] \quad (3-41)$$

$$T'_b = pT_A + T_B - T'_a \quad (3-42)$$

- (b) Causée par les pertes diélectriques l'élévation de température moyenne transitoire se calcule

must use an equivalent thermal circuit different from that described in Section 3.2. The coefficient p , used to apportion the thermal capacitance of the dielectric to the conductor and sheath must be replaced by :

where D_i and d_c are the outer and inner diameters of the dielectric.

The rest of the thermal circuit, outside the sheath, is the same as for the case of the conductor loss.

The fraction of the dielectric loss starting from the conductor is still reckoned as $1/2 W_d$, and the coefficients q_s , q_r , q_a and q_j are equal to 2.

3.7. Transient average temperature variation through dielectric or through oil filling in pipes.

The transient oil pressure variation of oil-filled cables may be calculated from a knowledge of the variation of both average dielectric temperature and conductor temperature, and formulae for calculating the transient average temperature rise (Morello, 1958) are given below in Section 3.7.1.

For oil-pressure pipe-type cables it is necessary to know the variation of average temperature of the oil contained between cables and pipe. The temperature variation to be calculated is that which occurs not through the dielectric but outside it. Section 3.7.2. contains formulae for calculating the average temperature of the oil.

For very short duration transients (in general 1 hour or less) these methods are not suitable and this matter will be dealt with in Part 2 under the heading of emergency ratings.

3.7.1. Oil-filled cables.

- (a) Due to the conductor loss the transient spatial average temperature rise of the dielectric above the outer surface of the cable is :

This formula is similar to that given in Section 3.2.4, the only difference being the use of thermal resistances T'_a and T'_b instead of T_a and T_b . The values of T'_a and T'_b are :

- (b) Due to dielectric loss the transient average temperature rise is calculated by means of

à l'aide d'une formule semblable à celle donnée dans 3.7.1 (a), mais avec :

W_c remplacé par $1/2 W_d$ et

le coefficient q_s à utiliser dans le calcul de T_B et de Q_B pris égal à 2.

Dans le cas de câbles pour tensions supérieures à 275 kV, le coefficient p du paragraphe 3.2.2 doit être remplacé par le coefficient p_d du paragraphe 3.6.2.

3.7.2. Câbles en tuyau à pression d'huile.

- (a) *Causée par les pertes dans le conducteur*, l'élévation de température moyenne transitoire de l'huile au-dessus de la température de la surface extérieure du tuyau (y compris le revêtement extérieur) est :

$$\theta_0(t) = W_0 \frac{T_B}{a - b} [a(1 - e^{-bt}) - b(1 - e^{-at})] \quad (3.43)$$

Cette formule est basée sur certaines hypothèses simplificatrices, y compris celles du paragraphe 3.2.3 (b), et il est douteux que l'élévation de température moyenne ainsi déterminée puisse avec certitude se rapporter au volume d'huile global. Malheureusement on n'est pas actuellement en mesure de proposer une formule meilleure.

- (b) *Causée par les pertes diélectriques*, l'élévation de température moyenne transitoire se calcule à l'aide d'une formule semblable à celle du paragraphe 3.7.2 (a) mais avec W_c remplacé par $1/2 W_d$ et les coefficients q_s et q_e , utilisés dans le calcul de T_A , T_B et Q_B , pris tous deux égaux à 2.

4. — Réponse à des variations cycliques du régime de charge des câbles enterrés.

On admet dans le présent chapitre que la tension a été appliquée pendant un temps suffisamment long pour que l'élévation de température du conducteur due aux pertes diélectriques ait atteint son état stationnaire, c'est-à-dire que seul le courant varie. L'élévation de température du conducteur au-dessus de l'ambiante est alors la somme de l'élévation de température stationnaire due aux pertes diélectriques (telle qu'elle est donnée par la publication CEI n° 287) et des variations de température transitoires dues aux variations du courant. Pour le calcul du facteur de capacité de transport cyclique, il suffit généralement d'effectuer séparément le calcul des variations de température transitoires dues aux variations de courant.

Supposons connue l'élévation de température du conducteur au bout de T heures après l'application d'un échelon de courant égal au courant nominal I et soit $\theta_R(T)$ sa valeur $\theta_R(T)$ est donnée par la fonction $\theta(t)$ du paragraphe 3.4, à la condition que l'amplitude de l'échelon de courant soit égale à la valeur du courant nominal en service continu (facteur de charge 100 %) et que t soit exprimé en heures).

a formula similar to that in 3.7.1 (a) but with :

W_c replaced by $1/2 W_d$, and

the coefficient q_s to be used in calculating T_B and Q_B equal to 2.

In the case of cables at voltages higher than 275 kV the coefficient p of Section 3.2.2 must be replaced by the coefficient p_d of Section 3.6.2.

3.7.2. Oil-pressure pipe-type cables.

- (a) due to conductor loss the transient average temperature rise of the oil above the outer surface of the pipe (including its outer covering) is :

This formula is based on some simplifying assumptions, including those of Section 3.2.3 (b), and it is doubtful whether the average temperature rise worked out in this way can be related with certainty to the whole volume of oil. Unfortunately no better formula can be suggested at present.

- (b) due to dielectric loss the transient average temperature rise is calculated by means of a formula similar to that in Section 3.7.2 (a) but with :

W_c replaced by $1/2 W_d$, and

the coefficients q_s and q_e used in calculating T_A , T_B and Q_B , both equal to 2.

4. — Response to cyclic variations of load current for buried cables.

For the present section it is assumed that the voltage has been applied for a sufficiently long time for the conductor temperature rise due to dielectric loss to have reached a steady state, i.e., only the current changes. The conductor temperature rise above ambient is then the sum of the steady state temperature rise due to dielectric loss (as given by IEC publication No. 287) and transient temperature variations due to changes of current. For cyclic rating factor calculation it is generally sufficient to give independent consideration to the calculation of transient temperature variations due to changes of current.

Let the conductor temperature rise at time T hours after the application of a step-function rated current I be assumed known and denoted by $\theta_R(T)$. ($\theta_R(T)$ is given by $\theta(t)$ of Section 3.4 provided that the magnitude of the step function current is the sustained (100 % load factor) rated current and that t is expressed in hours).

En suivant la technique de Goldenberg (1958) la totalité de la forme du cycle de charge est prise en considération pendant les six heures qui précèdent immédiatement l'instant où a lieu la pointe de température du conducteur et l'on prend pour la période précédente une valeur moyenne. Le facteur par lequel il faut multiplier le courant cyclique journalier pour atteindre, sans la dépasser, la température maximale admissible normalisée, peut être représenté par le produit de deux termes, à savoir (1) la valeur par laquelle la totalité du courant cyclique journalier doit être multipliée pour que sa valeur maximale soit égale au courant nominal en service continu 100 %, basée sur la température maximale admissible normalisée du conducteur, (2) le facteur de capacité de transport cyclique M , à savoir le facteur par lequel doit être multiplié le courant cyclique journalier ayant une valeur maximale égale au courant nominal en service continu 100 % pour atteindre, sans la dépasser, la température maximale admissible normalisée. Le présent chapitre a pour objet le calcul du facteur de capacité de transport cyclique M .

Soit un cycle journalier de courant dont la valeur maximale est égale au courant nominal en service continu 100 %; en réduisant à ce courant nominal le courant du cycle, son maximum est représenté par l'unité. On désignera par $Y_0, Y_1, Y_2, \dots, Y_{23}$, les amplitudes des créneaux horaires en lesquelles peut être décomposé le carré du courant cyclique journalier réduit; Y_r est une mesure du carré du courant équivalent de r à $(r + 1)$ heures avant l'époque à laquelle est attendu le maximum de température du conducteur (l'amplitude Y_0 est généralement égale à l'unité). On désignera par μ le facteur de charges des pertes du cycle, à savoir :

$$\mu = \frac{1}{24} \sum_{i=0}^{23} Y_i \quad (4-1)$$

L'élévation de température maximale du conducteur au-dessus de l'ambiante pour un courant cyclique journalier dont la valeur de pointe est égale au courant nominal est alors donnée par :

$$Y_0 \theta_R(1) + Y_1 [\theta_R(2) - \theta_R(1)] + Y_2 [\theta_R(3) - \theta_R(2)] \\ + Y_5 [\theta_R(6) - \theta_R(5)] + \mu [\theta_R(\infty) - \theta_R(6)]$$

Il en résulte que le produit de M^2 par l'expression précédente est égale à $\theta_R(\infty)$, d'où

$$M = \frac{1}{\left(\sum_{i=0}^5 Y_i \left[\frac{\theta_R(i+1) - \theta_R(i)}{\theta_R(\infty)} \right] + \mu \left[1 - \frac{\theta_R(6)}{\theta_R(\infty)} \right] \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (4-2)$$

dans laquelle $\theta_R(0) = 0$.

Une simplification de cette formule sera donnée plus loin pour les cas offrant le plus d'intérêt. Lorsque le facteur de charge μ des pertes d'un cycle est connu, la forme du cycle étant toutefois inconnue, on peut montrer que le cycle peut être considéré comme « plafonné à une valeur constante », voir paragraphe 4.1.3 ci-après.

Following the technique of Goldenberg (1958) the full shape of the load cycle is taken into consideration for the six hours immediately before the time of occurrence of peak conductor temperature, and an average value for earlier times. The factor by which the daily cyclic current is multiplied for the conductor to attain, but not exceed, the standard maximum permissible temperature, can be expressed as the product of two terms namely (1) the value by which the whole of the daily cyclic current must be multiplied so that its maximum value is equal to the sustained 100 % rated current, based on the standard maximum permissible conductor temperature, and (2) the cyclic rating factor M , namely, the factor by which the daily cyclic current, whose maximum value is equal to the sustained 100 % rated current, may be multiplied for the conductor to attain, but not exceed, the standard maximum permissible temperature. The present section is concerned with the calculation of the cyclic rating factor M .

The daily cyclic current whose maximum value is equal to the sustained 100 % rated current is first expressed as a proportion of the rated current, so that the maximum value is unity. Denote the magnitudes of the hourly rectangular pulses into which the square of the scaled daily cyclic current may be decomposed by $Y_0, Y_1, Y_2, \dots, Y_{23}$, where Y_r is a measure of the equivalent squared current between r and $(r + 1)$ hours prior to the expected time of maximum conductor temperature. (The magnitude of Y_0 is generally unity.) Denote μ as the loss load factor of the cycle, i.e.,

The maximum conductor temperature rise above ambient for a daily cyclic current whose peak value is the rated current is then given by :

It follows that M^2 multiplied by the above expression is equal to $\theta_R(\infty)$, and :

where $\theta_R(0) = 0$.

Simplification of this formula is given below for cases of most interest. When the loss load factor μ of the cycle is known, but the shape of the cycle is unknown, it can be shown that the cycle may be considered as 'flat-topped' — see Section (4.1.3) below.

4.1. Câble isolé.

On peut montrer en partant des formules des paragraphes 3.4, 3.2.4 et 3.3.1 que :

$$\frac{\theta(t)}{\theta(\infty)} = \frac{W_c(T_A + T_B) \alpha(t) + W_f T_4 \beta(t) \alpha(t)}{W_c(T_A + T_B) + W_f T_4} \quad (4-3)$$

dans laquelle

T_4 = résistance thermique extérieure d'un câble ou fourreau isolé = $\rho T/2 \eta \ln 4L/D_e$.

$$\alpha(t) = \frac{T_a(1 - e^{-at}) + T_b(1 - e^{-bt})}{T_A + T_B} \quad (4-4) \quad \text{et} \quad \text{and}$$

D_e = diamètre du câble ou diamètre extérieur du fourreau pour un câble en fourreau.

En conséquence, $\alpha(t)$ et $\beta(t)$ sont respectivement les coefficients de transfert de la première et de la deuxième partie du circuit thermique, tels que décrit au paragraphe 3.1.

On posera

$$k = \frac{W_f T_4}{W_c(T_A + T_B) + W_f T_4} \quad (4-6)$$

de telle sorte que k soit le rapport de l'élévation de température au-dessus de l'ambiante de la surface du câble ou du fourreau à l'élévation de température au-dessus de l'ambiante du conducteur en régime permanent.

On a alors :

$$\frac{\theta(t)}{\theta(\infty)} = [1 - k + k \beta(t)] \alpha(t)$$

et, t étant exprimé en heures par T ,

$$\frac{\theta_R(T)}{\theta_R(\infty)} = [1 - k + k \beta(T)] \alpha(T) \quad (4-7)$$

En conséquence le facteur de capacité de transport cyclique M est donné par les équations (4-2), (4-4), (4-5) et (4-7).

Dans les conditions qui seront précisées en détail au paragraphe 4-5, le facteur de capacité de transport cyclique peut se calculer en négligeant l'effet de la capacité calorifique du câble sur la réponse thermique du conducteur à un échelon de courant. Si ces conditions sont satisfaites, d'autres simplifications peuvent encore en découler.

4.1.1. Calcul effectué en négligeant la capacité calorifique du câble. Cycle de charge quelconque.

Lorsqu'on néglige l'effet de la capacité calorifique du câble $\alpha(T) = 1$, on a :

$$\frac{\theta_R(T)}{\theta_R(\infty)} = 1 - k + k \beta(T) \quad (4-8)$$

4.1. Isolated cable.

From the formulæ of Sections 3.4, 3.2.4 and 3.3.1 it may be shown that

$$\frac{\theta(t)}{\theta(\infty)} = \frac{W_c(T_A + T_B) \alpha(t) + W_f T_4 \beta(t) \alpha(t)}{W_c(T_A + T_B) + W_f T_4} \quad (4-3)$$

where

T_4 = external thermal resistance of isolated cable or duct = $\rho T/2 \pi \ln 4L/D_e$ -

$$\beta(t) = \frac{-Ei\left(-\frac{D_e^2}{16t\delta}\right) + Ei\left(-\frac{L^2}{t\delta}\right)}{2 \ln\left(\frac{4L}{D_e}\right)} \quad (4-5)$$

D_e = diameter of cable, or external diameter of duct if ducted cable. Accordingly, $\alpha(t)$ and $\beta(t)$ are the attainment factors for the first and second parts respectively of the thermal circuit described in Section 3.1.

Denote :

$$k = \frac{W_f T_4}{W_c(T_A + T_B) + W_f T_4} \quad (4-6)$$

so that k is the ratio of cable (or duct) surface temperature rise above ambient to conductor temperature rise above ambient under steady conditions. Then :

$$\frac{\theta(t)}{\theta(\infty)} = [1 - k + k \beta(t)] \alpha(t)$$

and, with t expressed in hours by T ,

$$\frac{\theta_R(T)}{\theta_R(\infty)} = [1 - k + k \beta(T)] \alpha(T) \quad (4-7)$$

Accordingly the cyclic rating factor M is given by Equations (4-2), (4-7), (4-4) and (4-5).

For conditions detailed in Section 4.5 the cyclic rating factor may be calculated neglecting the effect of thermal capacitance of the cable on the conductor temperature response to step-function current. If these conditions are satisfied further simplification results.

4.1.1. Calculation neglecting cable thermal capacitance. Any load cycle.

When the effect of cable thermal capacitance is neglected $\alpha(T) = 1$, and :

$$\frac{\theta_R(T)}{\theta_R(\infty)} = 1 - k + k \beta(T) \quad (4-8)$$

En substituant (4-8) dans l'équation (4-2) on obtient le facteur de capacité de transport cyclique M , qui peut s'écrire :

$$M = \frac{1}{((1-k) Y_0 + k \{B + \mu [1 - \beta(6)]\})^{1/2}} \quad (4-9)$$

dans laquelle :

$$B = Y_0 \Phi_0 + Y_1 \Phi_1 + Y_2 \Phi_2 + Y_3 \Phi_3 + Y_4 \Phi_4 + Y_5 \Phi_5 \quad (4-10)$$

$$\left. \begin{aligned} \Phi_0 &= \beta(1) \\ \Phi_i &= \beta(i+1) - \beta(i) \quad \left[\begin{array}{l} \text{pour} \\ \text{for} \end{array} \right. \quad i = 1, 2, \dots, 5 \end{aligned} \right\} \quad (4-11)$$

Le tableau 1 donne des valeurs numériques de Φ_0 à Φ_5 et $[1 - \beta(6)]$ pour une profondeur de câble ou de fourreau de 1 m et un sol de diffusivité thermique de $0,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, pour une série de valeurs du diamètre du câble ou du fourreau. Ces valeurs peuvent être utilisées pour des profondeurs de câble ou de fourreau dans la gamme de 0,75 m à 1,5 m avec une erreur généralement inférieure à 1,5 %.

4.1.2. Extension de la méthode à toute valeur de profondeur, de diffusivité et de résistivité thermique du sol.

Des valeurs numériques de Φ_0 à Φ_5 et de $[1 - \beta(6)]$ pour toute valeur spécifiée de profondeur de câble ou de fourreau et de diffusivité thermique du sol peuvent être obtenues à partir des équations (4-11) et (4-5), le temps t de l'équation (4-5) étant exprimé en heures. Le terme image $Ei(-L^2/t\delta)$ au numérateur de l'équation (4-5) peut être négligé. Pour le calcul de l'exponentielle intégrale, voir annexe II. La quantité k dépend de la résistivité thermique du sol comme l'exposera en détail le paragraphe 4.1.5.

4.1.3. Calcul effectué en négligeant la capacité calorifique du câble. Cycle de charge de valeur constante.

Dans le présent paragraphe, un cycle de charge de valeur constante doit être considéré comme un cycle dont le courant est maintenu à sa valeur maximale pendant une durée minimale de 6 heures, sans restriction aucune quant à la forme du reste du cycle, sauf l'élévation maximale de température du conducteur doit se produire à la fin de la durée du palier au maximum de courant.

L'équation (4-9) donnant le facteur de capacité de charge cyclique M se simplifie alors, puisque $B = \beta(6)$, et elle peut se mettre sous la forme

$$M = \frac{1}{(1 - k(1 - \mu) [1 - \beta(6)])^{1/2}} \quad (4-12)$$

Pour un cycle plafonné à une valeur constante comprenant le maintien du courant à sa valeur nominale en service continu 100 % pendant x heures ($x \geq 6$) et à une fraction p de sa valeur nominale en service continu 100 % pendant les $24 - x$ heures restantes du cycle, on a :

$$M = \frac{1}{(1 - k(1 - p^2) \left(\frac{24-x}{24}\right) [1 - \beta(6)])^{1/2}} \quad (4-13)$$

Des valeurs de $[1 - \beta(6)]$ peuvent être obtenues de la façon décrite après l'équation (4-11) au paragraphe 4.1.1., ainsi qu'au paragraphe 4.1.2.

Substitution from Equation (4-8) into Equation (4-2) gives the cyclic rating factor M which can be expressed as :

Numerical values of Φ_0 to Φ_5 and $1 - \beta(6)$ for a cable or duct depth of 1 m and a soil thermal diffusivity of $0.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ sec}^{-1}$ are given in Table 1, for a range of values of cable or duct diameters. These values may be used for cable or duct depths within the range 0.75 m to 1.5 m with an error generally less than 1.5 %.

4.1.2. Method for dealing with any value of depth, soil thermal diffusivity and resistivity.

Numerical values of Φ_0 to Φ_5 and $1 - \beta(6)$ for any specified values of cable or duct depth and of soil thermal diffusivity may be obtained from Equations (4-11) and (4-5), where the time t in Equation (4-5) is expressed in hours. The image term $Ei(-L^2/t\delta)$ in the numerator of Equation (4-5) may be neglected. For the calculation of the exponential integral, see Appendix II. The quantity k depends on soil thermal resistivity as detailed in Section 4.1.5.

4.1.3. Calculation neglecting cable thermal capacitance. Flat-topped load cycle.

For the present section a flat-topped load cycle is to be regarded as a cycle with a sustained maximum current for a minimum duration of 6 hours, without any restriction on the shape of the remainder of the cycle, except that the maximum conductor temperature rise occurs at the end of the duration of sustained maximum current.

Equation (4-9) for the cyclic rating factor M then simplifies, as $B = \beta(6)$, and may be expressed in the form :

For a flat-topped cycle consisting of the sustained 100 % rated current for x hours ($x \geq 6$) and a fraction p of the sustained 100 % rated current for the remaining $24 - x$ hours of the cycle

Numerical values for $1 - \beta(6)$ may be obtained as described after Equation 4-11 in Section 4.1.1. and in Section 4.1.2.

4.1.4. Evaluation de k .

Pour un câble enterré, k est le rapport de l'élévation de température au-dessus de l'ambiante de la surface du câble à l'élévation de température au-dessus de l'ambiante du conducteur en régime permanent, c'est-à-dire que k est donné par l'équation (4-6). La valeur de k peut aussi s'obtenir par la formule :

$$k = \frac{W_1 T_4}{\theta(\infty)} \quad (4-14)$$

où $\theta(\infty)$ est l'élévation de température au-dessus de l'ambiante du conducteur d'un câble fonctionnant en service continu 100 % de sa charge et donnant les pertes linéiques W_1 et où T_4 est la résistance thermique extérieure linéique.

Pour un câble en fourreau les équations (4-6) et (4-14) demeurent applicables, mais T_4 est la résistance thermique extérieure du fourreau et W_1 représente les pertes linéiques totales.

4.1.5. Extension de la méthode à toute valeur de résistivité thermique du sol.

Il convient de noter que k dépend de la profondeur du câble ou du fourreau et de la résistivité thermique du sol. De valeurs de k basées sur des résistivités thermiques de sol ρ_1 et ρ_2 , avec la même profondeur, sont liées entre elles par la formule

$$k(\rho_2) = \frac{1}{1 + \frac{\rho_1 [1 - k(\rho_1)]}{\rho_2 k(\rho_1)}} \quad (4-15)$$

4.1.6. Calcul faisant intervenir la capacité calorifique du câble.

Le facteur de charge cyclique M est donné par les équations (4-2), (4-4), (4-5) et (4-7) et son calcul peut être effectué en utilisant l'abaque de la fonction exponentielle intégrale des figures 4 et 5.

Pour un cycle de charge plafonné à une valeur constante, tel qu'il est défini au paragraphe 4.1.3., le facteur de capacité de transport cyclique peut s'exprimer par la formule :

$$M = \frac{1}{(1 - (1 - \mu) [1 - \alpha(t) + k\alpha(t) \{1 - \beta(t)\}])^{1/2}} \quad (4-16)$$

dans laquelle $\alpha(t)$ est donné par l'équation (4-4), t étant exprimé en heures et $[1 - \beta(t)]$ peut s'obtenir de la manière décrite après l'équation (4.11) du paragraphe 4.1.1. ci-dessus, ainsi qu'au paragraphe 4.1.2.

4.2. Circuit isolé comportant trois câbles ou fourreaux identiques également chargés et jointifs.

La méthode à employer pour le calcul du facteur de capacité de transport cyclique est la même que celle donnée au paragraphe 4.1. ci-dessus, sauf que :

4.1.4. Evaluation of k .

For a buried cable k is the ratio of cable surface temperature rise above ambient to conductor temperature rise above ambient under steady conditions, i.e., k is given by Equation 4.6. The value of k may also be found from the formula :

where $\theta(\infty)$ is the conductor temperature rise above ambient for the cable working at a sustained 100 % current giving losses W_1 per unit length of cable, and T_4 is the cable external thermal resistance per unit length.

For a ducted cable Equations (4-6) and (4-14) are still applicable, but T_4 is the external thermal resistance of the duct and W_1 is the total losses per unit length.

4.1.5. Method for dealing with any value of soil thermal resistivity.

It should be noted that k depends on cable or duct depth, and on soil thermal resistivity. Values of k based on soil thermal resistivities ρ_1 and ρ_2 , and a common depth, may be related by the formula :

4.1.6. Calculation including cable thermal capacitance.

The cyclic rating factor M is given by Equations (4-2), (4-4), (4-5) and (4-7) and its calculation may be expedited using the exponential integral scales of Figures 4 and 5.

For a flat-topped load cycle as defined in Section 4.1.3 the cyclic rating factor may be expressed as :

where $\alpha(t)$ is given by Equation (4-4), with t expressed in hours, and $1 - \beta(t)$ may be obtained as described after Equation (4-11) in Section 4.1.1 above and in Section 4.1.2.

4.2. Isolated circuit of three equally loaded identical touching cables or ducts.

The method to be adopted for the calculation of the cyclic rating factor is the same as given in Section 4.1 above, except that :

- (i) La résistance thermique extérieure T_4 , pour des câbles jointifs disposés en forme de trèfle ou pour des fourreaux jointifs disposés en trèfle, est donné par :

$$T_4 = \frac{\rho T}{2\pi} [\ln 2u + 2 \ln u] \quad (4-17)$$

où $u = 2L/D_e$

D_e = est le diamètre du câble ou le diamètre en fourreau.
pour un câble en fourreau.

On peut admettre que la formule de T_4 est applicable au cas de trois câbles en fourreaux posés à plat et jointifs.

- (ii) W_1 représente les pertes linéiques totales par câble ou par fourreau individuel.
- (iii) La valeur du diamètre de câble ou de fourreau à admettre dans le calcul de $\beta(T)$ et le cas échéant de Φ_0 à Φ_3 est celle d'un câble ou d'un fourreau unique*.

4.3. Groupe de câbles avec pertes égales. Câbles ou fourreaux non jointifs.

La formule générale pour le facteur de charge cyclique est donnée par (4-2), où $\theta_R(T)$ est l'élévation de température du conducteur au-dessus de l'ambiante tenant compte de l'échauffement qui provient de tous les câbles. L'élévation de température $\theta_R(T)$ du conducteur du câble le plus chaud d'un groupe à l'époque T heures après l'application simultanée d'un même échelon de courant nominal dans chaque câble peut s'exprimer par :

$$\frac{\theta_R(T)}{\theta_R(\infty)} = [1 - k_1 + k_1 \gamma(T)] \alpha(T) \quad (4-18)$$

où

k_1 est le rapport de l'élévation de température au-dessus de l'ambiante de la surface du câble (ou du fourreau) à l'élévation de température au-dessus de l'ambiante du conducteur en régime permanent, tous les câbles du groupe étant également chargés,

$\alpha(T)$ est donné par l'équation (4.4.), t étant exprimé en heures,

$\gamma(T)$ est donné par l'équation suivante, avec t exprimé en heures (voir le prochain alinéa commençant par « Le terme de sommation... » qui explique la raison pour laquelle on s'écarte de la formule (3-35).

$$\gamma(t) = \frac{-Ei\left(-\frac{D_e^2}{16t\delta}\right) + Ei\left(-\frac{L^2}{t\delta}\right) + (N-1) \left\{ -Ei\left(-\frac{d_f^2}{16t\delta}\right) + Ei\left(-\frac{L^2}{t\delta}\right) \right\}}{2 \ln \left(\frac{4LF}{D_e} \right)} \quad (4-19)$$

$$F = \frac{d'_{p1} \cdot d'_{p2} \cdots d'_{pk} \cdots d'_{p(N-1)}}{d_{p1} \cdot d_{p2} \cdots d_{pk} \cdots d_{p(N-1)}} \quad (4-20)$$

(*) Cette façon de procéder est légèrement plus prudente que la variante dans laquelle on considère une source linéaire au centre de chaque câble ou fourreau pour le calcul du régime thermique transitoire de la terre, mais cette dernière méthode a une validité limitée pour les câbles ou fourreaux jointifs.

- (i) the external thermal resistance T_4 , for cables in trefoil-touching formation or trefoil-touching ducts, is given by :

where $u = 2L/D_e$

D_e = diameter of cable, or external diameter of duct if ducted cable.

The formula for T_4 may be assumed to be applicable for three cables, or ducted cables, in flat touching formation.

- (ii) W_1 is the total loss per unit length per single cable or duct.
- (iii) The value of the cable or duct diameter to be assumed for the calculation of $\beta(T)$, and of Φ_0 to Φ_3 if required, is that of an isolated cable or duct*.

4.3. Group of cables with equal losses. Cables or ducts not touching.

The general formula for the cyclic rating factor is given by 4-2, where $\theta_R(T)$ is the conductor temperature rise above ambient taking into account heating from all of the cables. The conductor temperature rise $\theta_R(T)$ of the hottest cable of a group at time T hours after the simultaneous application of an equal step-function rated current in each cable may be expressed as :

where

k_1 ratio of cable (or duct) surface temperature rise above ambient to conductor temperature rise above ambient under steady conditions, and with all cables of the group equally loaded,

$\alpha(T)$ is given by equation (4-4), with t expressed in hours,

$\gamma(T)$ is given by the following equation, with t expressed in hours (see the following paragraph commencing "The summation term..." for the reason for departure from formula 3-35).

(*) This procedure is slightly on the safe side compared with the alternative of considering a line source at the centre of each cable or duct for the calculation of the earth thermal transient, but the latter method is of limited validity for touching cables or ducts .

il y a $(N-1)$ termes, le terme d'_{pp}/d_{pp} étant exclus.

there are $(N-1)$ terms with the term d'_{pp}/d_{pp} excluded.

$$d_f = \frac{4L}{F^{1/(N-1)}}$$

les distances d_{pk} et d'_{pk} étant définies au paragraphe 3.3.1. Les valeurs de D_e et de L à faire entrer dans le calcul de $\alpha(T)$ et de $\gamma(T)$ se rapportent au câble le plus chaud ou au fourreau contenant le câble le plus chaud d'un groupe.

and the distances d_{pk} and d'_{pk} are defined in Section 3.3.1. The values of D_e and L to be used for the calculation of $\alpha(T)$ and $\gamma(T)$ refer to the hottest cable, or the duct containing the hottest cable, of a group.

Le terme de sommation de l'équation du paragraphe 3.3.1. est dû à $(N-1)$ sources linéaires et aux $(N-1)$ puits images correspondants. On obtient une simplification des calculs, au prix d'une diminution modérée de la précision, en employant la technique de Neher (1964) (voir équation (4-19)), c'est-à-dire en remplaçant les $(N-1)$ sources et les $(N-1)$ puits images par une source linéaire unique et un puits image linéaire unique situés à des distances du centre du câble le plus chaud (ou du fourreau contenant le câble le plus chaud) telles que l'on obtiendra la même valeur en régime permanent.

The summation term in the equation of Section 3.3.1 is due to $N-1$ line sources and $N-1$ corresponding image line sinks. Simplicity in calculation, with only a small loss of accuracy, is achieved by using technique of Neher (1964) (See Equation 4-19), namely replacing the $N-1$ sources and $N-1$ sinks by a single line source and image sink located at distances from the centre of the hottest cable (or duct containing the hottest cable) so that the same steady-state value is achieved.

4.3.1. Calcul en négligeant la capacité calorifique du câble. Cycle de charge quelconque.

4.3.1. Calculation neglecting cable thermal capacitance. Any load cycle.

Si l'on néglige l'effet de la capacité calorifique du câble $\alpha(T) = 1$ et l'on a

When the effect of cable thermal capacitance is neglected $\alpha(T) = 1$, then

$$\frac{\theta_R(T)}{\theta_R(\infty)} = 1 - k_1 + k_1 \gamma(T) \quad (4-21)$$

La substitution de l'équation (4-21) dans l'équation (4-22) donne le facteur de charge cyclique M .

Substitution from Equation (4-21) into Equation (4-2) gives the cyclic rating factor M .

4.3.2. Calcul en négligeant la capacité calorifique du câble. Cycle de charge plafonné à une valeur constante.

4.3.2. Calculation neglecting cable thermal capacitance. Flat-topped load cycle.

Avec un cycle à charge plafonné à une valeur constante tel qu'il a été défini au paragraphe 4.3.1., le facteur de capacité de transport cyclique peut être mis sous la forme :

With a flat-topped cycle as defined in Section 4.1.3 the cyclic rating factor M may be expressed in the form :

$$M = \frac{1}{\left(\frac{\theta_R(6)}{\theta_R(\infty)} + \mu \left\{ 1 - \frac{\theta_R(6)}{\theta_R(\infty)} \right\} \right)^{1/2}} \quad (4-22)$$

où $\theta_R(6)/\theta_R(\infty)$ est donné par l'équation (4-21).

where $\theta_R(6)/\theta_R(\infty)$ is given by Equation (4-21).

4.3.3. Evaluation de k_1 .

4.3.3. Evaluation of k_1 .

k_1 est le rapport de l'élévation de température au-dessus de l'ambiante de la surface du câble (ou du fourreau) à l'élévation de température au-dessus de l'ambiante du conducteur en régime permanent, pour le câble le plus chaud du groupe, tous les câbles ayant les mêmes pertes. k_1 est donné par :

k_1 is the ratio of cable (or duct) surface temperature rise above ambient to conductor temperature rise above ambient under steady conditions, for the hottest cable of the group, with all cables having equal losses. k_1 is given by :

$$k_1 = \frac{W_I(T_A + \Delta T_A)}{W_C(T_A + T_B) + W_I(T_A + \Delta T_A)} \quad (4-23)$$

où T_A est la résistance thermique extérieure du câble le plus chaud du groupe s'il est seul, $T_A + \Delta T_A$ est la résistance thermique extérieure

where T_A is the external thermal resistance of the hottest cable of the group if isolated, $T_A + \Delta T_A$ is the external thermal resistance of the hottest cable

du câble le plus chaud du groupe en tenant compte des pertes de tous les câbles du groupe,

$$\Delta T_4 = \frac{\rho_T \ln F}{2\pi} \quad (4-24)$$

et où les pertes du conducteur W_c et les pertes du câble W_l par unité de longueur, pour le câble le plus chaud du groupe, correspondant à un fonctionnement de tous les câbles à 100 % de leur charge, de telle sorte que l'élévation de température au-dessus de l'ambiante $\theta(\infty)$ du conducteur du câble le plus chaud du groupe soit atteinte mais non dépassée.

k_1 peut aussi être donné par la formule :

$$k_1 = \frac{W_l (T_4 + \Delta T_4)}{\theta(\infty)} \quad (4-25)$$

L'équation (4.15.) donne, en remplaçant partout k par k_1 la relation entre k_1 et la résistivité thermique du sol.

4.3.4. Calcul faisant intervenir la capacité calorifique du câble.

La méthode est décrite au paragraphe 4.3. et peut être accélérée par l'emploi du nomogramme de la fonction exponentielle intégrale des figures 4 et 5. Pour un cycle de charge plafonné à une valeur constante, tel qu'il est défini au paragraphe 4.1.3., le facteur de charge cyclique est donné par l'équation (4-22), dans laquelle $\theta_R(6)/\theta_R(\infty)$ est obtenu à partir de l'équation (4-18).

4.4. Groupe de circuits de trois câbles ou fourreaux identiques, également chargés et jointifs.

La méthode à employer pour le calcul du facteur de charge cyclique est la même que celle donnée au paragraphe 4.3. ci-dessus, avec les réserves suivantes :

- (i) La résistance thermique extérieure T_4 , dont dépend la valeur de k_1 , est celle d'un circuit isolé de trois câbles ou fourreaux jointifs. La valeur de T_4 est donnée par l'équation (4-17).
- (ii) La valeur de N à utiliser dans le calcul de $\gamma(t)$, F et d_p , par les équations (4-19) et (4-20), est le nombre de circuits (de trois câbles unipolaires par circuit) et les valeurs de d'_{pk} et d_{pk} à employer sont données par :
 d_{pk} = distance du centre du circuit k au centre du circuit contenant le câble le plus chaud,
 d'_{pk} = distance de l'image du centre du circuit k au centre du circuit contenant le câble le plus chaud.
- (iii) Le deuxième membre de l'équation (4-24) doit être multiplié par 3, F se déterminant comme il est dit en (ii),
- (iv) W_l sont les pertes totales par unité de longueur d'un câble ou fourreau individuel,
- (v) La valeur du diamètre du câble ou du fourreau à faire intervenir dans le calcul de $\gamma(T)$ est celle d'un câble ou fourreau individuel.

of the group taking into account the losses in all cables of the group,

and the conductor losses W_c and cable losses W_l per unit length of cable for the hottest cable of the group correspond to all cables working at a sustained 100 % current, i.e., so that the temperature rise above ambient $\theta(\infty)$ of the conductor of the hottest cable of the group is reached but not exceeded.

k_1 may also be found from the formula :

The dependence of k_1 on soil thermal resistivity is given by Equation (4-15) with k replaced by k_1 throughout.

4.3.4. Calculation including cable thermal capacitance.

The method is described in Section 4.3 and may be expedited using the exponential integral scales of Figures 4 and 5. For a flat-topped load cycle as defined in Section 4.1.3 the cyclic rating factor is given by Equation (4-22), where $\theta_R(6)/\theta_R(\infty)$ is obtained from Equation (4-18).

4.4. Group of circuits of three equally loaded identical touching cables or ducts.

The method to be adopted for the calculation of the cyclic rating factor is the same as that given in Section 4.3 above, except that :

- (i) the external thermal resistance T_4 on which the value of k_1 is dependent, relates to an isolated circuit of three touching cables or ducts. The value of T_4 is given by Equation (4-17),
- (ii) the value of N to be used for the calculation of $\gamma(t)$, F and d_p in Equations (4-19) and (4-20) is the number of circuits (of three single-core cables per circuit), and the values of d'_{pk} and d_{pk} to be used are given by :
 d_{pk} = distance from centre of circuit k to centre of circuit containing hottest cable,
 d'_{pk} = distance from image of centre of circuit k to centre of circuit containing hottest cable,
- (iii) the right hand side of Equation (4-24) should be multiplied by 3, with F given by (ii) above,
- (iv) W_l is the total loss per unit length per single cable or duct,
- (v) the value of the cable or duct diameter to be assumed for the calculation of $\gamma(T)$ is that of an isolated cable or duct.

4.5. Critères permettant de négliger la capacité calorifique de câbles soumis à des régimes de charges cycliques.

Les composants d'un câble déterminent la capacité calorifique (et la résistance thermique) qui influencent en général la réponse thermique d'un conducteur à des courants de charge variables. Cependant, si la constante de temps thermique effective de ces composants est suffisamment faible, l'effet de la capacité calorifique du câble peut être négligé sans risque.

L'amplitude de l'erreur commise en négligeant la capacité calorifique du câble, qui est d'ailleurs dans le bon sens, dépend de la forme du cycle de charge, qui peut pour plus de commodité être représenté par le facteur de charge des pertes μ . En général on peut estimer que l'erreur commise sur un facteur de charge cyclique, calculé suivant les méthodes données dans le présent document, ne dépasse pas $\pm 3\%$ à condition que l'on tienne compte de la capacité calorifique du câble et que μ ne soit pas inférieur à 0,4. Dans les cas où μ n'est pas inférieur à 0,4 et où l'on néglige la capacité calorifique, il peut y avoir des cas extrêmes où la marge dépasse 5 % dans le sens favorable.

On considère que la capacité calorifique des câbles peut être négligée pour :

- Toutes les tailles et tous les types de câbles pour tensions nominales inférieures ou égales à 33 kV, avec toutes les formes de cycle de charge. On estime que la marge ne dépasse pas 5 % dans le bon sens.
- Tous les câbles pour lesquels le facteur de charge des pertes n'est pas inférieur à 0,65, la moyenne des ordonnées Y_0 , Y_1 et Y_2 (voir paragraphe 4) n'étant pas inférieure à 0,9 et la moyenne de Y_3 , Y_4 et Y_5 n'étant pas inférieure à 0,7. On estime que l'écart ne dépasse pas 3 % dans le bon sens pour les câbles sous enveloppe 5 % pour les câbles et tuyau.
- Les câbles sous enveloppe pour lesquels le facteur de charge des pertes n'est pas inférieur à 0,4 et les ordonnées Y_0 à Y_5 ont les mêmes caractéristiques qu'en (b). On estime que l'écart ne dépasse pas 5 % dans le bon sens.

4.5. Criteria for neglecting the thermal capacitance of cables carrying cyclic load currents.

The components of a cable constitute thermal capacitance (and resistance) which, in general, will influence the temperature response of a conductor to varying load currents. However, if the effective thermal time constant of these components is sufficiently small the effect of cable thermal capacitance can be safely neglected.

The magnitude of the error, which will be on the safe side, involved in neglecting cable thermal capacitance depends on the shape of the load cycle, which for convenience can be represented by the loss load factor μ . In general, the error in a cyclic rating factor calculated by the methods given in this document is estimated not to exceed $\pm 3\%$ provided that the effect of cable thermal capacitance is included and μ is not less than 0.4. In cases where μ is not less than 0.4 and thermal capacitance is neglected there may be extreme cases where the margin will exceed 5 % on the safe side.

It has been estimated that cable thermal capacitance can be neglected for :

- All sizes and types of cable for nominal voltages up to and including 33 kV, for any shape of load cycle. The margin is estimated not to exceed 5 % on the safe side.
- All cables where the loss load factor μ is not less than 0.65, the average of the ordinates Y_0 , Y_1 and Y_2 (see Section 4) is not less than 0.9 and the average of Y_3 , Y_4 and Y_5 is not less than 0.7. The margin is estimated to be not greater than 3 % on the safe side for self contained cables and 5 % for pipe type cables.
- Self-contained cables where the loss load factor is not less than 0.4 and the ordinates Y_0 to Y_5 are as in (b) above. The margin is estimated not to exceed 5 % on the safe side.

TABLEAU 1 — TABLE 1

Diamètre du câble ou diamètre intérieur de fourreau, m.

	Cable diameter or inner duct diameter, m.														
	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.055	0.060	0.065	0.070	0.075	0.080	0.085	0.090	0.095	0.100
Φ_0	0.298	0.277	0.257	0.239	0.223	0.207	0.193	0.180	0.168	0.156	0.145	0.135	0.126	0.117	0.100
Φ_1	0.069	0.071	0.072	0.073	0.074	0.075	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.075	0.074	0.074	0.073
Φ_2	0.041	0.042	0.043	0.044	0.045	0.045	0.046	0.046	0.047	0.047	0.047	0.048	0.048	0.048	0.048
Φ_3	0.029	0.030	0.031	0.031	0.032	0.033	0.033	0.034	0.034	0.034	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
Φ_4	0.023	0.023	0.024	0.025	0.025	0.025	0.026	0.026	0.026	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.028
Φ_5	0.019	0.019	0.020	0.020	0.020	0.021	0.021	0.021	0.022	0.022	0.022	0.023	0.023	0.023	0.023
$1 - \beta(6)$	0.521	0.538	0.553	0.568	0.581	0.594	0.605	0.617	0.627	0.638	0.648	0.657	0.667	0.667	0.684

Diamètre du câble ou diamètre intérieur de fourreau, m.

	Cable diameter or inner duct diameter, m.														
	0.105	0.110	0.115	0.120	0.125	0.130	0.135	0.140	0.145	0.150	0.155	0.160	0.165	0.170	0.175
Φ_0	0.101	0.093	0.086	0.080	0.074	0.068	0.063	0.058	0.053	0.049	0.045	0.041	0.038	0.034	0.031
Φ_1	0.072	0.071	0.070	0.069	0.068	0.067	0.065	0.063	0.062	0.060	0.059	0.057	0.056	0.054	0.052
Φ_2	0.048	0.048	0.047	0.047	0.047	0.046	0.046	0.046	0.045	0.045	0.044	0.044	0.043	0.043	0.042
Φ_3	0.035	0.035	0.036	0.036	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.034	0.034	0.034
Φ_4	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028
Φ_5	0.023	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024
$1 - \beta(6)$	0.693	0.701	0.709	0.716	0.724	0.731	0.738	0.745	0.752	0.758	0.765	0.771	0.777	0.783	0.789

Diamètre du câble ou diamètre intérieur de fourreau, m.

	Cable diameter or inner duct diameter, m.														
	0.180	0.185	0.190	0.195	0.200	0.205	0.210	0.215	0.220	0.225	0.230	0.235	0.240	0.245	0.250
Φ_0	0.029	0.026	0.024	0.022	0.020	0.018	0.016	0.015	0.013	0.012	0.011	0.010	0.009	0.008	0.007
Φ_1	0.050	0.048	0.047	0.045	0.043	0.042	0.040	0.038	0.037	0.035	0.033	0.032	0.030	0.029	0.027
Φ_2	0.041	0.041	0.040	0.039	0.038	0.037	0.037	0.036	0.035	0.034	0.033	0.033	0.032	0.031	0.030
Φ_3	0.034	0.033	0.033	0.032	0.032	0.032	0.031	0.031	0.031	0.030	0.030	0.029	0.029	0.028	0.028
Φ_4	0.028	0.028	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.026	0.026	0.026	0.025	0.025	0.025	0.025
Φ_5	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.022	0.022	0.022
$1 - \beta(6)$	0.794	0.800	0.805	0.811	0.816	0.821	0.826	0.830	0.835	0.840	0.844	0.848	0.853	0.857	0.861

Valeurs de Φ_i et de $1 - \beta(6)$ pour une diffusivité thermique du sol de $0,5 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Values of Φ_i and $1 - \beta(6)$ for Soil Thermal Diffusivity of $0.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ sec}^{-1}$.

5. — Constantes physiques des matériaux.

5. — Physical constants of materials.

5.1. Résistivités thermiques.

5.1. Thermal resistivities.

TABLEAU 2
Résistivités thermiques de matériaux

Matériau	Résistivité thermique $^{\circ}\text{C m W}^{-1}$
Isolation au papier dans les câbles solides	6,0
Isolation au papier dans les câbles à huile fluide	5,0
Isolation au papier dans les câbles à gaz	5,5
Polyéthylène et polyéthylène réticulé	3,5
PVC	6,0
E.P.R., caoutchouc butyl, caoutchouc	5,0
Polychloroprène	5,5
Matériau pour fourreau en fibre	4,8
Matériau pour fourreau en ciment d'amiante	2,0
Poterie	1,2
Béton	1,0
Matériau pour fourreau en PVC	7,0
Matériau pour fourreau en polyéthylène	3,5
Revêtements extérieurs textiles	6,0

TABLE 2
Thermal resistivities of materials

Material	Thermal resistivity $^{\circ}\text{C m W}^{-1}$
Paper insulation in solid type cables	6.0
" " " oil filled cables	5.0
" " " cables with gas pressure	5.5
Polyethylene and cross linked polyethylene	3.5
PVC	6.0
E.P.R., butyl rubber, rubber	5.0
Polychloroprene	5.5
Fibre duct material	4.8
Asbestos cement duct material	2.0
Earthenware	1.2
Concrete	1.0
PVC duct material	7.0
Polyethylene duct material	3.5
Textile servings	6.0

Nota : La résistance thermique de l'huile ou du gaz de remplissage pour câbles en tuyau est calculée par la méthode donnée au paragraphe 9.8 de la publication CEI 287.

Note : The thermal resistance of oil or gas filling for pipe-type cables is calculated by the method given in Section 9.8 of IEC Publication 287.

5.2. Chaleurs spécifiques des matériaux.

TABLEAU 3
Chaleurs spécifiques des matériaux

Matériau	Chaleur spécifique $J^{\circ}C^{-1} m^{-3}$
Cuivre	$3,45 \times 10^6$
Aluminium	2,5 "
Huile	1,7 "
Papier imprégné	2,0 "
Plomb	1,45 "
Bronze	3,4 "
Laiton	3,0 "
Acier	3,8 "
Azote à 15 bars	0,017 "
PVC	1,7* "
Polyéthylène	2,4* "
Caoutchouc et matériaux analogues au caoutchouc	2,0 "
Revêtements textiles	2,0 "
Protection des tuyaux contre la corrosion	2,0 "
Béton	-
Matériaux pour fourreaux	-

* Les valeurs diffèrent suivant les produits, mais les valeurs données ici devraient être employées par prudence.

5.3. Diffusivité du sol.

Dans le calcul des facteurs de charge cyclique il n'est pas nécessaire de connaître avec précision la valeur de la diffusivité et il est en général satisfaisant d'utiliser les fonctions tabulées données au chapitre 4, qui sont basées sur une valeur de diffusivité $0,5 \times 10^{-6} m^2 s^{-1}$ et qui correspondent en gros à un sol ayant une résistivité thermique de $1,0^{\circ}C m W^{-1}$, ainsi qu'une teneur en humidité d'environ 7 % du poids sec. Dans des cas exceptionnels et lorsque la teneur en humidité a des chances d'être beaucoup plus faible, il est recommandé d'utiliser les méthodes données au chapitre 4 pour le calcul des capacités de transport basées sur d'autres valeurs de diffusivité. Le choix d'une valeur de diffusivité peut se faire en utilisant les moyens ci-dessous.

La valeur de la diffusivité est importante pour le calcul de la réponse transitoire et, en fonction de la quantité de données disponible sur le sol en question, la valeur de la diffusivité doit être choisie de la façon suivante :

(1) La diffusivité δ peut être estimée (Arrighi, 1970) si l'on a pu mesurer les grandeurs suivantes : densité, teneur pondérale en eau et résistivité thermique.

$$\delta = \frac{10^{-3}}{\rho_T d (0.82 + 0.042 \eta)} m^2 sec^{-1}$$

5.2. Thermal capacities of materials.

TABLE 3
Thermal capacities of materials

Material	Thermal capacity (joule $^{\circ}C^{-1} m^{-3}$)
Copper	3.45×10^6
Aluminium	2.5 "
Oil	1.7 "
Impregnated paper	2.0 "
Lead	1.45 "
Bronze	3.4 "
Brass	3.0 "
Steel	3.8 "
Nitrogen at 15 atmospheres	0.017 "
PVC	1.7* "
Polyethylene	2.4* "
Rubber and rubber like materials	2.0 "
Textile servings	2.0 "
Anti-corrosion protection on pipes	2.0 "
Concrete	-
Duct materials	-

* Different compounds have different values, but the values given above should be used for safety.

5.3. Diffusivity of soil.

For calculation of cyclic rating factors it is not necessary to know accurately the value of diffusivity and it is generally satisfactory to use the tabulated functions given in Section 4 which are based on a value of $0.5 \times 10^{-6} m^2 sec^{-1}$, and correspond roughly to a soil having a thermal resistivity of $1.0^{\circ}C m W^{-1}$, and a moisture content of around 7 % of dry weight. For exceptional cases, and where moisture content is likely to be much lower, it is advisable to use the methods given in Section 4 to calculate ratings based on alternative values of diffusivity.

Selection of a value of diffusivity can be made using the procedure set out below. For calculation of the transient response the value of diffusivity is important and, according to the extent of the data available on the soil in question, the value of diffusivity should be chosen as follows :

(1) The diffusivity δ can be estimated (Arrighi, 1970) if the following quantities have been measured : density, moisture content by weight and thermal resistivity.

où

ρ_T = résistivité thermique, °C m W⁻¹,

d = densité à sec kgm⁻³,

η = teneur en humidité, % du poids sec.

Il existe en variante des méthodes de laboratoires bien connues pour mesurer la diffusivité.

(2) Si l'on ne connaît que la résistivité thermique, la diffusivité peut être obtenue d'après le tableau suivant basée sur la formule de Neher (Neher, 1964).

TABLEAU 4
Valeurs de la diffusivité du sol

Résistivité thermique °C m W ⁻¹	Diffusivité m ² s ⁻¹
0,5	0,8 × 10 ⁻⁶
0,6	0,7 "
0,7	0,6 "
0,8	0,6 "
0,9	0,5 "
1,0	0,5 "
1,2	0,4 "
1,5	0,4 "
2,0	0,3 "
2,5	0,2 "
3,0	0,2 "

(3) Si l'on ne dispose d'aucune donnée sur le sol, prendre une valeur de diffusivité de 0,5 × 10⁻⁶ m² s⁻¹.

ANNEXE I

Réduction d'un circuit thermique multiple à un circuit à deux cellules

Un circuit thermique équivalent a besoin de beaucoup d'éléments pour représenter les différentes parties comprises entre le conducteur et la surface extérieure de câbles de structure complexe, tels que les câbles triplomb et la résolution des équations mathématiques qui leur correspondent demande de longs calculs. Afin de simplifier le calcul et dans le but de normaliser la procédure pour tous les types de câbles non traités dans le document principal, on a recommandé au paragraphe 3.2.5. de recourir à la méthode suivante (Baudoux, 1962) pour combiner les différents éléments d'un tel circuit en demi-cellules. Cette méthode s'applique aux objectifs visés par le présent rapport lorsqu'il s'agit de durée généralement supérieure ou égale à 1 heure.

Selon les instructions données au paragraphe 3.2.5. les différents éléments d'un câble sont représentés, soit par une capacité, soit par une résistance, soit par une cellule complète résistance-capacité, et ils sont associés dans un circuit série comme le montre la figure 3.

Il convient de noter que le nombre de capacités peut dépasser celui des résistances d'une unité. En ce cas la dernière capacité, Q_{v+1} est court-circuitée.

where

ρ_T = thermal resistivity, °C m W⁻¹,

d = dry density, kgm⁻³,

η = moisture content, % of dry weight.

Alternatively, there are well known laboratory methods for measuring diffusivity.

(2) If only the thermal resistivity is known, then the diffusivity can be obtained from the following table which is based on Neher's formula (Neher, 1964).

TABLE 4
Values of diffusivity of the soil

Thermal resistivity °C m W ⁻¹	Diffusivity m ² sec ⁻¹
0.5	0.8 × 10 ⁻⁶
0.6	0.7 "
0.7	0.6 "
0.8	0.6 "
0.9	0.5 "
1.0	0.5 "
1.2	0.4 "
1.5	0.4 "
2.0	0.3 "
2.5	0.2 "
3.0	0.2 "

(3) If no data are available on the soil, use a value of diffusivity of 0.5 × 10⁻⁶ m² sec⁻¹.

APPENDIX I

Reduction of a multiple thermal circuit to one having two sections

An equivalent thermal circuit requires many elements in order to represent parts between conductor and outer surface of cables of complex construction, e.g., S.L. type cables, and solution of the corresponding mathematical equations calls for lengthy calculation. In order to simplify the calculation, and with the object of standardising the procedure for all cable types not dealt with in the main document, the following method (Baudoux, 1962) for combining the several elements in such a circuit into two sections is recommended in Section 3.2.5. This method may be used for the purposes of this report for periods of time generally greater than or equal to 1 hour.

Following the instructions given in Section 3.2.5, the different elements of a cable are represented by either a capacitance or a resistance or a complete resistance-capacitance section, and are associated together in a series circuit as shown in Figure 3.

Note that the number of capacitances may exceed the number of resistances by one. In this case the last capacitance, Q_{v+1} is short-circuited.

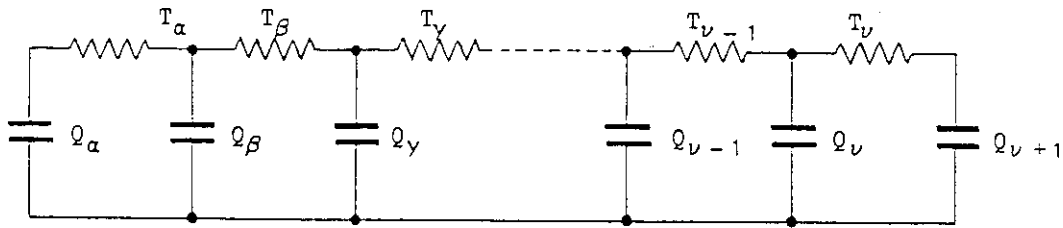


FIG. 3.

Réseau série général représentant un câble.
General series network representing a cable.

Il est possible de tirer du circuit précédent un circuit équivalent représentant le câble avec une précision suffisante et comportant seulement deux cellules $T_A Q_A$ et $T_B Q_B$ comme le montre la figure 2 du paragraphe 3.2.3. La première section $T_A Q_A$ du circuit dérivé est constituée des éléments $T_A = T_\alpha = T_1$ et $Q_A = Q_\alpha = (Q_c + pQ_i)$ sans modification, afin de maintenir une réponse transitoire correcte pour des temps relativement courts.

La deuxième section $T_B Q_B$ du circuit dérivé est constituée, à partir des cellules restantes $T_s Q_s$ à $T_\nu Q_\nu$, en égalant l'impédance thermique de la deuxième cellule dérivée à l'impédance totale de ces cellules.

L'équation pour le calcul de l'impédance thermique du circuit allant de $T_s Q_s$ à $T_\nu Q_\nu$ est :

$$Z(s) = \frac{1}{\frac{sQ\beta + 1}{T\beta + 1} \frac{sQ\beta + 1}{T\gamma + \dots} + \dots + \frac{1}{sQ_\nu + \frac{1}{T_\nu}}} \quad (6-1)$$

et l'équation correspondante pour le calcul du circuit simple équivalent est :

$$Z_e(s) = \frac{1}{sQ_e + \frac{1}{T_e}} \quad (6-2)$$

La résistance thermique totale doit être la même dans les deux cas, car les deux circuits doivent donner le même résultat en régime permanent; on a donc :

$$T_e = T_\beta + T_\gamma + T_\delta + \dots + T_{\nu-1} + T_\nu \quad (6-3)$$

En égalant les deux équations (6-1) et (6-2) on obtient une première approximation pour la capacité équivalente du circuit dérivé en comparant les termes du premier degré en s et en négligeant les termes de degré plus élevé :

$$Q_e = Q_\beta + \left(\frac{T_\gamma + T_\delta + \dots + T_\nu}{T_\beta + T_\gamma + \dots + T_\nu} \right)^2 Q_\gamma + \left(\frac{T_\delta + T_e + \dots + T_\nu}{T_\beta + T_\gamma + \dots + T_\nu} \right)^2 Q_\delta + \dots + \left(\frac{T_\nu}{T_\beta + T_\gamma + \dots + T_\nu} \right)^2 Q_\nu \quad (6-4)$$

An equivalent circuit, which represents the cable with sufficient accuracy, can now be derived having two sections $T_A Q_A$ and $T_B Q_B$ as shown in Figure 2 of Section 3.2.3. The first section $T_A Q_A$ of the derived circuit is made up of $T_A = T_\alpha = T_1$ and $Q_A = Q_\alpha = (Q_c + pQ_i)$ without modification in order to maintain the correct response for relatively short durations.

The second section $T_B Q_B$ of the derived circuit is made up from the remaining sections $T_s Q_s$ up to $T_\nu Q_\nu$ by equating the thermal impedance of the second derived section to the total impedance of the multiple sections. The operational equation for the thermal impedance of the circuit $T_B Q_B$ to $T_\nu Q_\nu$ is :

and the corresponding operational equation of the simple equivalent circuit is :

The total thermal resistance must be the same for each case because both circuits must give the same steady state result, and therefore

Equating equations (6-1) and (6-2) an approximation for the equivalent capacitance of the derived circuit is obtained by comparing the first degree terms in s , and neglecting terms of higher degree.

Les constantes localisées du circuit dérivé peuvent alors être ainsi récapitulées :

The lumped constants for the derived circuit are summarised as follows :

$$T_A = T_\alpha = T_1$$

$$Q_A = Q_\alpha = Q_c + pQ_i$$

$T_B = T_e$ donné par l'équation (6-3).
 $Q_B = Q_e$ donné par l'équation (6-4).

$T_B = T_e$ as given above in equation (6-3),
 $Q_B = Q_e$ as given above in equation (6-4).

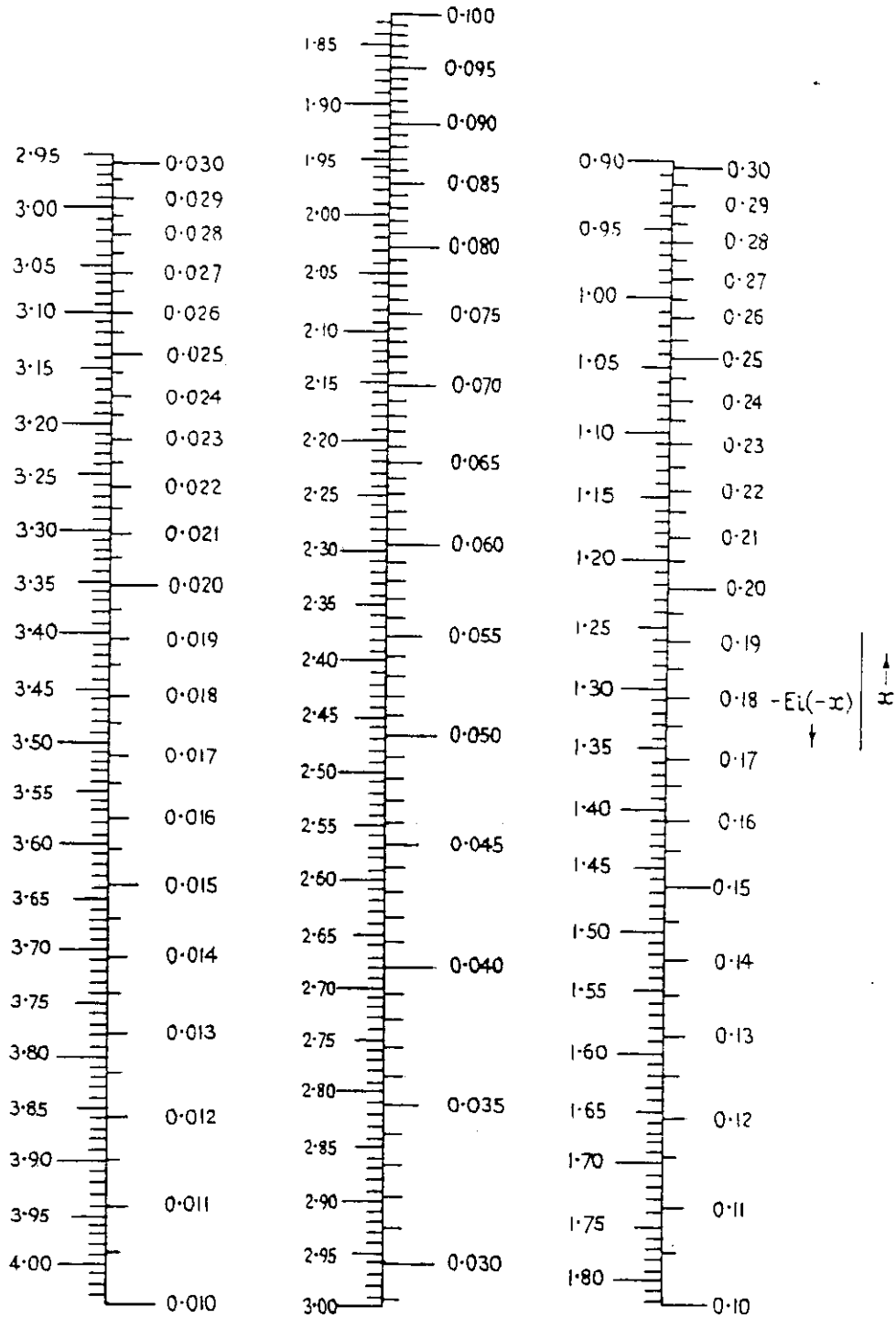


FIG. 4.

Nomogramme de l'exponentielle intégrale
 $0,01 \leq x \leq 0,30$
 Scales for exponential integral
 $0.01 \leq x \leq 0.30$

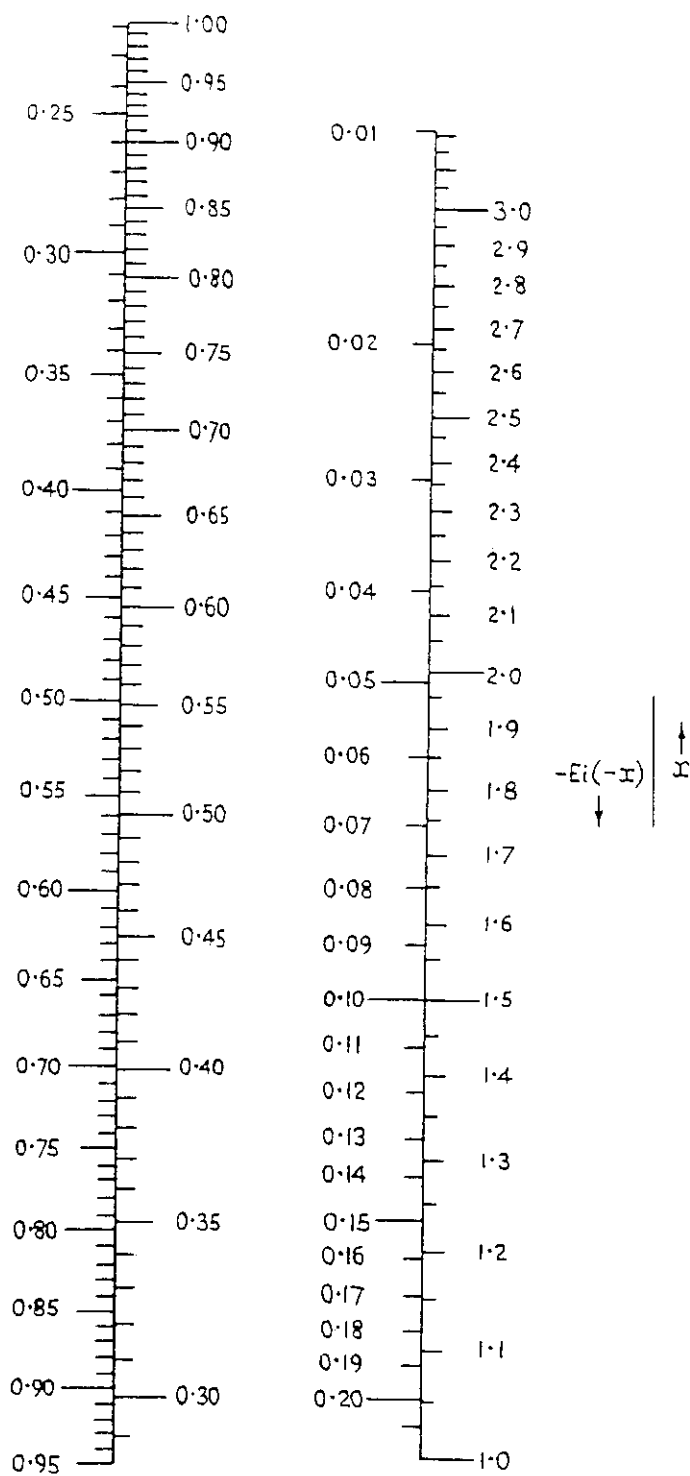


FIG. 5.

Nomogramme de l'exponentielle intégrale
 $0,30 \leq x \leq 3,0$

Scales for exponential integral
 $0.30 \leq x \leq 3.0$

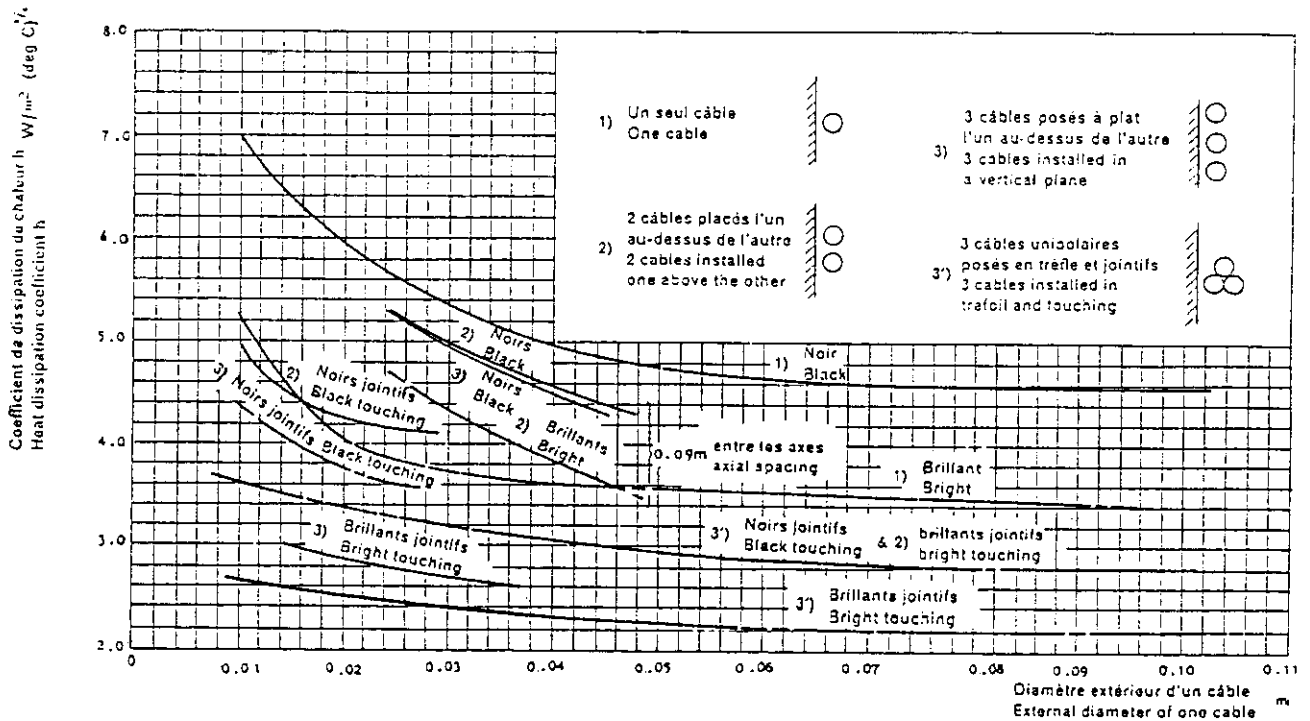


FIG. 6.

Coefficient de dissipation de chaleur pour les câbles posés à l'air libre.
Heat dissipation coefficient for cables in air.

ANNEXE II

APPENDIX II

Valeurs de l'exponentielle intégrale

Values of the exponential integral

La fonction exponentielle intégrale de x , désignée par

The exponential integral function of x , denoted by $-Ei(-x)$, is defined by:

$Ei(-x)$, est définie par :

$$-Ei(-x) = \int_x^\infty \frac{\exp(-u)}{u} du,$$

et elle a été tabulée de façon très complète par le National Bureau of Standards (1940) et par d'autres. Par exemple :

and has been extensively tabulated by the National Bureau of Standards (1940) and others. For example :

$$-Ei(-d^2/(16 Dt)) = -Ei(-x_1)$$

avec

where

$$x_1 = d^2/(16 Dt)$$

La précision de ces tableaux n'est pas nécessaire pour les besoins du présent document et l'on a besoin d'une méthode plus rapide donnant une précision limitée. En conséquence les figures 4 et 5 donnent des échelles graduées de la fonction exponentielle intégrale qui permettent d'obtenir un résultat à 0,01 près. Ces figures couvrent respectivement les gammes $0,01 < x < 0,30$ et $0,30 < x < 3,0$. Ces échelles sont reproduites d'après Goldenberg (1969), où la méthode de calcul est indiquée. Un tableau critique permettant l'évaluation de $-Ei(-x)$

For the purposes of this document the precision of these tables is not required, and a more rapid method is needed which gives a limited accuracy. Accordingly, scales for the exponential integral are given in Figures 4 and 5, permitting the evaluation to the nearest 0.01 in the result. Figures 4 and 5 cover the ranges $0.01 < x < 0.30$ and $0.30 < x < 3.0$ respectively. The scales are reproduced from Goldenberg (1969), where the method of derivation is given. A critical table permitting the evaluation of $-Ei(-x)$ to the nearest 0.01 in the result is given

avec un résultat approché à 0,01 près est donnée dans le tableau 1 (2^{me} partie) de Goldenberg (1957). On peut remarquer que pour $x < 0,1$, $-Ei(-x) \approx 0,577 - \ln x + x$ avec une précision de 1 %.

in Table 1 (Part 2) of Goldenberg (1957). It may be noted that, for $x < 0,1$, $-Ei(-x) \approx 0,577 - \ln x + x$ to within 1 % accuracy.

BIBLIOGRAPHIE - REFERENCES

- ARRIGHI R, RIDON R, BENARD P, CAUSSE L. (1970). — Contribution à l'étude de l'environnement thermique des câbles enterrés. Contribution to the study of the thermal environment of buried cables. (CIGRE 1970, Paper 21-06).
- BAUDOIX J., VERBESSELET J., FREMINEUR A. (1962). — Etude des régimes thermiques des machines électriques par modèles analogique, application aux câbles et aux transformateurs. Study of the thermal conditions of electrical machines by analogous models. Application to cables and transformers. (CIGRE 1962, Paper 126).
- BULLER F. H. (1951). — Thermal transients on buried cables. (Trans. Amer. Inst. Elect. Engrs., 1951, Vol. 70, Pt. 1, pp. 45-52).
- CIGRE n° 233 (1964). — Rapport sur les travaux du Comité d'Etudes n° 2. Annexe I. Capacités de transport des câbles transitant une charge constante (facteur de charge 100 %). (Egalement reproduit dans la Publication CEI n° 287). Report on the Work of Study Committee n° 2. Appendix I. Calculation of the continuous current rating of cables (100 % load factor). (Also reproduced in an edited form in IEC Publication No. 287).
- GOLDENBERG H. (1957). — The calculation of external resistance and cyclic rating factors for groups of cables laid direct in the ground or in ducts. (ERA Report, Ref. F/T192 (1957)).
- GOLDENBERG H. (1958). — The calculation of cyclic rating factors and emergency loading for one or more cables laid direct or in ducts. (Proc. IEE (1958), Vol. 105 C., pp. 46-54).
- GOLDENBERG H. (1967 A). — Transient heating of buried power cables. (Proc. IEE (1967), Vol. 114, No. 6, pp. 809-816).
- GOLDENBERG H. (1967 B). — Thermal transients in linear systems with heat generation linearity temperature dependent : Application to buried cables. Proc. IEE (1967), Vol. 114, Pt. 3, pp. 375-377.
- GOLDENBERG H. (1969). — Scales for all the exponential integral $-Ei(-x)$. (ERA Report, Ref. 5266 (1969)).
- IEC (1969) Publication 287. — Calculation of the continuous current rating of cables (100 % load factor).
- JAEGER J. C., NEWSTEAD G. H. (1958). — Transient heating of buried cables. (Proc. IEE (1958), Vol. 105 C, pp. 57-60).
- MCGRATH M. H. (1964). — Discussion on Neher (1964). (IEEE Trans. Power App. and Syst. 1964, Vol. 83, p. 113).
- MORELLO A. (1958). — Transient temperature variations in power cables. (L'Elettrotecnica, 1958, Vol. XLV, pp. 213-222).
- National Bureau of Standards (1940). — Tables of sine, cosine and exponential integrals, Vol. 1.
- NEHER J. H. (1951). — The determination of temperature transients in cable systems by means of an analogue computer. (Trans. Amer. Inst. Elect. Engrs. 1951, Vol. 70, Pt. 2, pp. 1361-1369).
- NEHER J. H. (1953). A simplified mathematical procedure for determining the transient temperature rise of cable systems. (Trans. Amer. Inst. Elect. Engrs 1953, Vol. 72, Pt. 3, pp. 712-718).
- NEHER J. H. (1964). — The transient temperature rise of buried cable systems. (IEEE. Trans. 1964, Vol. 83, Pt. 3, pp. 102-114).
- PASQUALINI G., FLAMAND Ch. A., TERRAMORSI G., WAUTHIER R. (1968). — Refroidissement des câbles transportant de grandes puissances à de grandes distances. High power long distances cable cooling. (CIGRE 1968, Paper 21-08).
- RUDANKO K. (1964). — Calcul des températures des câbles d'énergie au Japon. Etudes et performances. On the calculation of temperature in power cables under variable loads. (CIGRE 1964, Paper 216).
- VAN WORNER F. C. (1955). — An improved approximate technique for calculating cable temperature transients. (AIEE Trans. Vol. 74, Pt. 3, pp. 277-281).
- WHITEHEAD S., HUTCHINGS E. E. (1938). — Current ratings of cables for transmission and distribution. (AIEE. 1938, Vol. 83, pp. 517-557).
- WLODARSKI R., CABIAC M. (1966). — Recent studies and experiments on the determination of transient heating of buried cables. (Polish Academy of Sciences, Scientific Centre in Paris, Conference Collection 66).
- WOLLASTON F. O. (1949). — Transient temperature phenomena of 3 conductor cables. (AIEE. Trans. 1949. Col. 68. Pt. 2, pp. 1284-1297).

Le CIGRÉ a apporté le plus grand soin à la réalisation de cette brochure thématique numérique afin de vous fournir une information complète et fiable.

Cependant, le CIGRÉ ne pourra en aucun cas être tenu responsable des préjudices ou dommages de quelque nature que ce soit pouvant résulter d'une mauvaise utilisation des informations contenues dans cette brochure.

Publié par le CIGRÉ
21, rue d'Artois
FR-75 008 PARIS
Tél. : +33 1 53 89 12 90
Fax : +33 1 53 89 12 99

Copyright © 2000

Tous droits de diffusion, de traduction et de reproduction réservés pour tous pays.

Toute reproduction, même partielle, par quelque procédé que ce soit, est interdite sans autorisation préalable. Cette interdiction ne peut s'appliquer à l'utilisateur personne physique ayant acheté ce document pour l'impression dudit document à des fins strictement personnelles.

Pour toute utilisation collective, prière de nous contacter à sales-meetings@cigre.org

The greatest care has been taken by CIGRE to produce this digital technical brochure so as to provide you with full and reliable information.

However, CIGRE could in any case be held responsible for any damage resulting from any misuse of the information contained therein.

*Published by CIGRE
21, rue d'Artois
FR-75 008 PARIS
Tel : +33 1 53 89 12 90
Fax : +33 1 53 89 12 99*

Copyright © 2000

All rights of circulation, translation and reproduction reserved for all countries.

No part of this publication may be produced or transmitted, in any form or by any means, without prior permission of the publisher. This measure will not apply in the case of printing off of this document by any individual having purchased it for personal purposes.

For any collective use, please contact us at sales-meetings@cigre.org