

CHAPITRE 2: REGLES DE CALCUL ELECTRIQUE

Sommaire

2.1	GENERALITES	59
2.2	CONSTRAINTES DIELECTRIQUES APPLIQUEES AUX OUVRAGES	59
2.2.1	CARACTERISTIQUES DE L'ISOLEMENT DES OUVRAGES	59
2.2.1.1	CONSTRAINTES DIELECTRIQUES	59
2.2.1.2	CARACTERISTIQUES D'ISOLEMENT DES OUVRAGES	61
2.2.1.2.1	Tension de tenue aux chocs de manoeuvre et de foudre	61
2.2.2	DIMENSIONNEMENT DES CHAINES D'ISOLATEURS.	65
2.2.3	NIVEAUX D'ISOLEMENT NORMALISES RETENUS POUR LES LIGNES AERIENNES	67
2.2.3.1	LONGUEUR MINIMALE DE LA LIGNE DE FUITE DES CHAINES D'ISOLATEURS	67
2.2.3.2	TENSIONS DE TENUE ET DISTANCES D'ISOLEMENT ASSOCIEES	69
2.3	CONSTRAINTES DIELECTRIQUES DUES A LA FOUDRE - CABLE DE GARDE	69
2.3.1	CONSTRAINTES APPLIQUEES A UN OUVRAGE TOUCHE PAR LA FOUDRE	69
2.3.1.1	DEFAUTS DUS A UN COUP DE FOUDRE DIRECT	71
2.3.1.2	DEFAUTS DUS A UN AMORCAGE EN RETOUR	71
2.3.2	ROLE ET POSITIONNEMENT DU CABLE DE GARDE	71
2.3.2.1	ROLE DU CABLE DE GARDE	71
2.3.2.2	NOMBRE DE DEFAUTS D'ECRAN DUS AUX COUPS DE FOUDRE DIRECT	71
2.3.2.3	NOMBRE MAXIMAL DE DEFAUTS DUS AUX AMORCAGES EN RETOUR	73
2.3.2.4	POSITIONNEMENT DU CABLE DE GARDE	73
2.3.3	ROLE ET INSTALLATION DES ECLATEURS D'ENTREE DE POSTE	75
2.4	CONSTRAINTES PARTICULIERES DUES A LA TENSION	77
2.4.1	GENERALITES SUR L'EFFET DE COURONNE	77
2.4.2	DETERMINATION DES PERTES PAR EFFET DE COURONNE	79
2.4.2.1	METHODE DE DETERMINATION DES PERTES	79
2.4.3	NIVEAU PERTURBATEUR RADIOELECTRIQUE	85
2.4.3.1	NIVEAU PERTURBATEUR DES CONDUCTEURS	85
2.4.3.2	NIVEAU PERTURBATEUR DU MATERIEL D'EQUIPEMENT	89
2.4.4	NIVEAU PERTURBATEUR ACOUSTIQUE	89
2.4.4.1	NIVEAU DU BRUIT ACOUSTIQUE - RELATION EMPIRIQUE	89

2.5	CONTRAINTES DUES AU COURANT - ECHAUFFEMENT	91
2.5.1	GENERALITES	91
2.5.1.1	REGIMES DE FONCTIONNEMENT A CONSIDERER	93
2.5.1.1.1	Régime permanent	93
2.5.1.1.2	Régime de surcharge temporaire	95
2.5.2	ECHAUFFEMENT DES CONDUCTEURS EN REGIME ETABLI	97
2.5.2.1	TEMPERATURES AMBIANTES	97
2.5.2.2	REGIME PERMANENT	97
2.5.2.3	REGIME DE SURCHARGE TEMPORAIRE	97
2.5.2.4	INTENSITES ADMISSIBLES	99
2.6	CONTRAINTES DUES AU COURANT INDUCTION	99
2.6.1	INDUCTION DANS LES CIRCUITS DE TELECOMMUNICATION	99
2.6.2	DIRECTIVES ET GUIDES DU C.C.I.T.T.	99
2.7	CONTRAINTES ELECTRIQUES DANS LES CANALISATIONS	101
2.7.1	CONDITIONS A RESPECTER ET PHENOMENES A CONSIDERER	101

COMMENTAIRES

Paragraphe 2.2.1 : CARACTERISTIQUES DE L'ISOLEMENT DES OUVRAGES:

Les données de base développées dans ce paragraphe sont extraites des documents suivants :

-Publication CEI 71-1 et 2 (édition 1976),

Ouvrage collectif EDF-DER : "Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tension" édité chez Eyrolles en 1984,

Technique de l'ingénieur fascicule D670 et D671 : "Choix et coordination des isolements des lignes et postes" par C.GARY,

Document EDF/DER: "Lignes aériennes à haute et très haute tension : règles d'isolation" Juin 1976

2.1 GENERALITES

Les règles permettant le dimensionnement des lignes aériennes vis-à-vis des phénomènes électriques sont essentiellement dues à deux types de contraintes :

- les contraintes liées à la tension électrique et qui vont permettre de définir les règles d'isolement des ouvrages ainsi que les précautions à prendre vis-à-vis de l'effet de couronne,
- les contraintes liées à l'écoulement des courants électriques et qui vont permettre de définir les sections des câbles en fonction des températures maximales admissibles, ainsi que les précautions à prendre vis-à-vis des phénomènes d'induction entraînés par les courants de forte intensité (courants de défaut).

2.2 CONTRAINTES DIELECTRIQUES APPLIQUEES AUX OUVRAGES

2.2.1 CARACTERISTIQUES DE L'ISOLEMENT DES OUVRAGES

L'isolement des lignes aériennes est obtenu en maintenant, en toutes circonstances, des "intervalles d'air" entre les conducteurs eux-mêmes et entre les conducteurs et les objets à la masse.

Cette isolation a pour caractéristiques essentielles d'être naturelle et autorégénératrice (elle retrouve ses propriétés isolantes d'origine après un contournement) .

La détermination de la valeur minimale de ces intervalles est fonction des contraintes diélectriques appliquées à ces ouvrages et des niveaux d'isolement souhaités pour ceux-ci.

2.2.1.1 CONTRAINTES DIELECTRIQUES

Les lignes aériennes sont soumises à deux types de contraintes électriques pour lesquelles les caractéristiques d'isolement sont définies :

Les contraintes d'origine interne au réseau et qui sont liées au fonctionnement même de celui-ci, ce sont en particulier :

- les tensions permanentes à fréquence industrielle,
- les surtensions temporaires à fréquence industrielle de courte durée (de l'ordre de la seconde) et apparaissant, en général, lors de défauts,
- les surtensions de manoeuvre de très faible durée (de l'ordre de la milliseconde) prépondérantes pour les réseaux de tension nominale supérieure à 300 kV (enclenchement ou réenclenchement à vide, par exemple).

Les contraintes d'origine externe au réseau subies par la ligne et transmises par celle-ci au reste du réseau:

- Il s'agit des contraintes liées à la foudre.

COMMENTAIRES

paragraphe 2.2.1.2 : CARACTERISTIQUES D'ISOLEMENT DES OUVRAGES

La révision de la publication CEI 71-1 et 2 , en cours de préparation prévoit d'inclure la tension 225kV dans la gamme C.

2.2.1.2 CARACTERISTIQUES D'ISOLEMENT DES OUVRAGES

La publication 71-1 de la C.E.I. distingue trois gammes de tension :

- gamme A : $1 \text{ kV} < U_m < 52 \text{ kV}$
- gamme B : $52 \text{ kV} \leq U_m < 300 \text{ kV}$
- gamme C : $U_m \geq 300 \text{ kV}$

U_m étant la tension entre phases la plus élevée pour le matériel.

Pour les gammes A et B, les niveaux d'isolement sont tels que les surtensions de manoeuvre ne posent que rarement un problème majeur et la coordination d'isolement est alors principalement fondée sur les surtensions de foudre.

Pour la gamme C, l'importance des surtensions de manoeuvre devient prépondérante.

2.2.1.2.1 TENSION DE TENUE AUX CHOCS DE MANOEUVRE ET DE Foudre

U_{50} est la valeur de la tension qui, pour un intervalle d'air donné caractérisé par une distance dans l'air d (mètres) et un facteur d'intervalle k lié à sa géométrie, correspond à une probabilité de provoquer 50% d'amorçages.

U_{50} dépend de la polarité et de la forme de l'onde.

La tension de tenue s'exprime en fonction de la tension U_{50} .

L'expérience a montré que la probabilité d'amorçage en fonction de la tension crête suit une loi Normale, caractérisée par cette valeur U_{50} et un écart-type σ .

Cette loi Normale n'étant pas bornée, on a défini conventionnellement la tension tenue par:

$$U_t = U_{50} (1 - 2,5\sigma)$$

La tension tenue U_t correspond ainsi à une probabilité d'amorçage inférieure à 1%.

On a déterminé expérimentalement la valeur de U_{50} dans les cas de chocs de manoeuvre et de chocs de foudre normalisés, en fonction des variables d et k :
Ces expressions sont données pour les impulsions positives qui sont les plus contraignantes.

Tension de tenue aux chocs de manoeuvre U_{Tm}

$$U_{50} = k \frac{3400}{1 + \frac{8}{d}} \quad \text{et} \quad \sigma = 0,05$$

$$U_{Tm} = U_{50} (1 - 2,5\sigma) = 0,88U_{50}$$

Tension de tenue aux chocs de foudre U_{Tf}

$$U_{50} = (360 + 150k) d \quad \text{et} \quad \sigma = 0,015$$

$$U_{Tf} = U_{50} (1 - 2,5\sigma) = 0,96U_{50}$$

COMMENTAIRES

TABLEAU DES FACTEURS D'INTERVALLE

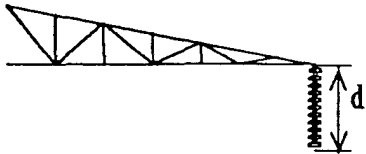
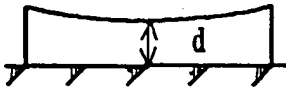
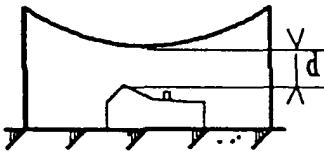

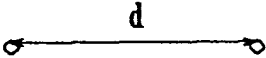
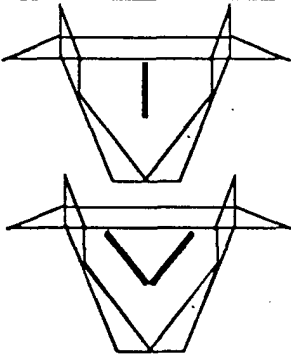
Les valeurs des facteurs d'intervalle données par le tableau sont définies à partir des documents de référence cités précédemment.

Elles constituent un compromis entre les valeurs données par EDF/DER et celles données par les autres documents.

Facteur d'intervalle.

L'étude expérimentale a été réalisée avec un intervalle de référence pointe-plan ($k = 1$).

Pour d'autres configurations d'intervalles courantes dans la construction des lignes aériennes, on peut se reporter au tableau suivant qui indique différentes valeurs de k .

TYPE D'INTERVALLE		K
INTERVALLE ENTRE CORNE ET RAQUETTE DANS LE CAS D'UNE CHAÎNE VERTICALE SIMPLE EN EXTREMITÉ DE CONSOLE		1.50
INTERVALLE CONDUCTEUR-SOL		1.45
INTERVALLE CONDUCTEUR-OBJET A LA MASSE (VEHICULE, BATIMENT, Etc)		1.30
INTERVALLE TIGE-PLAN		1.20
CONDUCTEUR-CONDUCTEUR		1.60
INTERVALLE ENTRE CORNE ET RAQUETTE DANS LE CAS D'UNE CHAÎNE (SIMPLE OU EN V) A L'EXTERIEUR DE LA FENÊTRE DU PYLON		1.20

Facteur d'intervalle de quelques configurations

2.2.2 DIMENSIONNEMENT DES CHAINES D'ISOLATEURS.

L'expérience a montré que la pollution est un facteur déterminant du dimensionnement des chaînes d'isolateurs.

Le dimensionnement des chaînes d'isolateurs est par conséquent fonction du niveau de pollution dans les régions traversées par les ouvrages à construire, suivant la carte publiée par l'ONE.

A titre indicatif, le tableau ci-après, extrait de la Publication 815, donne une description approximative des environnements typiques et une classification des niveaux de pollution correspondants.

Niveaux de pollution	Exemples d'environnements caractéristiques
I. Faible	<ul style="list-style-type: none"> - Zones sans industries et avec faible densité d'habitations équipées d'installations de chauffage - Zones avec faible densité d'industries ou d'habitations mais soumises fréquemment aux vents et/ou aux pluies - Régions agricoles - Régions montagneuses <p>Toutes ces zones doivent être situées à des distances d'au moins 10 km à 20 km de la mer et ne doivent pas être exposées aux vents venant directement de la mer</p>
II. Moyen	<ul style="list-style-type: none"> - Zones avec industries ne produisant pas de fumées particulièrement polluantes et/ou avec une densité moyenne d'habitations équipées d'installations de chauffage - Zones à forte densité d'habitations et/ou d'industries mais soumises fréquemment aux vents et/ou à des chutes de pluies - Zones exposées au vent de mer, mais pas trop proches de la côte (distantes d'au moins quelques kilomètres)
III. Fort	<ul style="list-style-type: none"> - Zones avec forte densité d'industries et banlieues de grandes villes avec forte densité d'installations de chauffage polluantes - Zones situées près de la mer, ou en tout cas exposées à des vents relativement forts venant de la mer
IV. Très fort	<ul style="list-style-type: none"> - Zones généralement peu étendues, soumises à des poussières conductrices et à des fumées industrielles produisant des dépôts conducteurs particulièrement épais - Zones généralement peu étendues, très proches de la côte et exposées aux embruns ou aux vents très forts et polluants venant de la mer - Zones désertiques caractérisées par de longues périodes sans pluie, exposées aux vents forts transportant du sable et du sel et soumises à une condensation régulière

NOTA: Les distances au rivage dépendent de la topographie de la zone côtière et des conditions extrêmes de vent (Cf carte POLLUTION-ONE)

Les études du mécanisme de contournement des isolateurs pollués ont permis de mettre en évidence :

- que la longueur de la ligne de fuite d'un isolateur est le facteur essentiel de son comportement,
- que certaines conditions géométriques doivent être vérifiées pour le choix du profil de l'isolateur (voir publication 815 de la CEI),
- que la combinaison de ces deux facteurs (ligne de fuite et profil de l'isolateur) est fonction de la nature et du niveau de pollution du site concerné.

COMMENTAIRES

TABLEAU DES LIGNES DE FUITE

-Zone IV (très fort) : ligne de fuite de 33mm/kV, estimée sur la base de l'isolement de ligne 60kV ayant un comportement satisfaisant en zone de pollution avec isolement type P (ancienne version f8P, F12P)

Les zones correspondantes sont situées au bord de mer sur des sites industriels, ou sur une largeur de 20 à 25 km le long de la méditerranée et de l'atlantique.

Zonz IV (côte saharienne) : ligne de fuite de 31mm/kV, estimée sur la base des indications de la CEI 815. Elle reste à confirmer après les études sur sites, commencées entre CAAYOÛNE et BOUCRAA en janvier 1988 et AITMELLOUL en Juin 1988.

La zone correspondante est située au sud d'AGADIR, sur une bande de 40km de largeur le long de la côte atlantique.

Le tableau ci-après fixe, pour chaque niveau de pollution, la valeur de la ligne de fuite nominale spécifique minimale Lf_0 qui a été retenue à la suite de l'étude du comportement des isolateurs sur le réseau Marocain (Cf étude ONE/EDF sur la pollution des isolements en Mars 1988).

Niveau de pollution	Ligne de fuite nominale spécifique minimale mm/kV (1)	
	Valeurs de la CEI 815	Valeurs adoptées par ONE
I. Faible	16	16
II. Moyen	20	20
III. Fort	20	25
IV. Très fort	31	20
IV. Côte saharienne		> 31

(1) Rapport de la ligne de fuite mesurée entre la phase et la terre à la valeur efficace de la tension entre phases la plus élevée pour le matériel.

Il est entendu que les valeurs indiquées dans le tableau précédent sont données à titre indicatif. L'isolement de chaque ouvrage sera déterminé en fonction de la région traversée et du comportement des ouvrages existants.

La ligne de fuite nominale minimale (Lf) d'une chaîne d'isolateurs placée entre phase et terre est déterminée, suivant le niveau de pollution rencontré, par la relation suivante :

$$Lf = Lf_0 \times U_m \times K_D$$

Lf_0 : ligne de fuite nominale spécifique minimale en mm/kV compte tenu du niveau de pollution

U_m : tension entre phases en kV la plus élevée pour le matériel (CEI 71-1)

K_D : facteur de majoration dépendant du diamètre moyen de l'isolateur (CEI 815). Dans le cas des isolateurs type capot et tige, $K_D = 1$

2.2.3 NIVEAUX D'ISOLEMENT NORMALISES RETENUS POUR LES LIGNES AERIENNES

2.2.3.1 LONGUEUR MINIMALE DE LA LIGNE DE FUITE DES CHAINES D'ISOLATEURS

Pour chacun des niveaux de pollution définis au paragraphe 2.2.2 : "DIMENSIONNEMENT DES CHAINES D'ISOLATEURS.", on associe une longueur minimale de la ligne de fuite totale des chaînes d'isolateurs à la tension de l'ouvrage.

COMMENTAIRES

TABLEAU DES LONGUEURS DE LIGNE DE FUIITE

Les valeurs figurant sur ce tableau sont données à titre indicatif pour constituer un minimum.

Paragraphe 2.3 : CONTRAINTES DIELECTRIQUES DUES A LA Foudre -CABLE DE GARDE

Pour plus d'information sur ce paragraphe , voir la note technique ERT-LHT N° 1-Cal-Elec du 15-3-1988 , intitulée "Positionnement du câble de garde - modèle électrogéométrique "

Les longueurs de ces lignes de fuite, déterminées en considérant la tension la plus élevée pour le matériel, sont les suivantes :

TENSION NOMINALE ENTRE PHASES (EN kV)	TENSION LA PLUS ELEVEE ENTRE PHASES POUR LE MATERIEL (EN kV)	LONGUEUR MINIMALE DE LA LIGNE DE FUITE DES CHAINES D'ISOLATEURS (EN mm)			
		NIVEAU DE POLLUTION			
		Faible I	Moyen II	Fort III	Très fort IV
60	72,5	1160	1450	1813	2393
100	123	1968	2460	3075	4059
150	170	2720	3400	4250	5610
225	245	3920	4900	6125	8085
400	420	6420	8400	10500	13860
Ligne de fuite spécifique mm/kV		16	20	25	33

NOTA: Pour des isolateurs destinés à être installés entre phases d'un réseau triphasé (espateurs, rotation de phase, etc ...), il convient de multiplier la longueur de la ligne de fuite par $\sqrt{3}$.

2.2.3.2 TENSIONS DE TENUE ET DISTANCES D'ISOLEMENT ASSOCIEES

Les valeurs d'isolement des lignes aériennes sont données dans le tableau ci-dessous

Tension nominale du réseau (kV)	60	90	150	225	400
Tension la plus élevée entre phases pour le matériel (kV)	72,5	123	170	245	420
Distance masse dans le pylône sans vent (m)	0,50	0,50	1,15	1,70	3,00
Tension de tenue aux chocs de foudre du pylône	260	370	610	900	1580
Tension de tenue aux chocs de manoeuvre en du pylône (kV)					
entre phase et terre	---	---	---	---	1060
entre phases	---	---	---	---	1600
Distance d'isolement entre cornes des chaînes (m)	---	0,58	1,00	1,00	2,50
Tension de tenue aux chocs de foudre des chaînes (kV)	---	310	530	800	1320
Tension de tenue aux chocs de manoeuvre des chaînes entre phases et terre (kV)	---	---	---	---	930

2.3 CONTRAINTES DIELECTRIQUES DUES A LA Foudre - CABLE DE GARDE

2.3.1 CONTRAINTES APPLIQUEES A UN OUVRAGE TOUCHE PAR LA Foudre

On distingue deux types de défauts dus à la foudre :

- les défauts dus à des coups de foudre directs,
- les défauts dus à un amorçage en retour.

2.3.1.1 DEFANTS DUS A UN COUP DE Foudre DIRECT

Ce type de défaut apparaît lorsque la foudre atteint un conducteur et que la valeur du courant de foudre est suffisante pour provoquer un amorçage au niveau des chaînes isolantes.

Ce type de défaut apparaît :

- sur les ouvrages sans câble de garde,
- lorsque le câble de garde n'a pas joué son rôle d'écran protecteur (défaut d'écran).

Ce type de défaut est généralement monophasé.

2.3.1.2 DEFANTS DUS A UN AMORCAGE EN RETOUR

Lorsque la foudre atteint un support (ou un câble de garde) l'écoulement du courant de foudre vers la terre entraîne une élévation de potentiel des structures métalliques.

La tension apparaissant aux bornes des chaînes d'isolateurs dépend alors :

- de l'impédance du support ,
- de l'impédance et de la résistance de la prise de terre ,
- de la répartition du courant de foudre entre les câbles de garde s'ils existent et les différents supports.

Lorsque l'élévation de potentiel dépasse la tension de tenue de la chaîne d'isolateurs un amorçage, dit amorçage en retour, se produit. Ce type d'amorçage peut être polyphasé et risque également d'entraîner des défauts simultanés sur les ouvrages supportant plusieurs ternes.

2.3.2 ROLE ET POSITIONNEMENT DU CABLE DE GARDE

2.3.2.1 ROLE DU CABLE DE GARDE

La probabilité d'amorçage d'un pylône lors d'un coup de foudre direct sur les conducteurs étant considérée comme forte , la protection de l'ouvrage est assurée par la mise en place de câbles de garde au-dessus des conducteurs. Chaque câble de garde est relié électriquement à la terre. Sa fonction est de capter les coups de foudre avant qu'ils n'atteignent le câble conducteur actif dans une proportion donnée suffisamment faible (défauts d'écran).

La probabilité décroît pour une tension d'ouvrage croissante (Cf paragraphe 2.2.3.2 : tableau des tensions de tenue ,ci-avant).

2.3.2.2 NOMBRE DE DEFANTS D'ECRAN DUS AUX COUPS DE Foudre DIRECT

C'est le nombre de coups de foudre directs sur conducteur actif provoquant un amorçage sur une ligne équipée de câble de garde.

Il constitue un objectif lors de la conception de la famille de pylônes compte tenu des considérations technico-économiques qui ne permettent pas toujours d'obtenir une protection totale des conducteurs.

La détermination du nombre de défauts d'écrans sur les pylônes à l'aide du modèle électrogéométrique est exposée dans la note technique ERT/LHT du 15.3.1988 .

Sa valeur maximale est fonction de la topographie du terrain, du type d'armement du pylône, du niveau céramique et du nombre de coup de foudre touchant le sol.

Elle doit être inférieures aux valeurs suivantes adoptées sur la base des hypothèses EDF en Janvier 1988.

Tension de l'ouvrage (en kV)	Nb de défaut par an et par 100km	Troncons concernés
400	1	par circuit 400 kV
225	2	par circuit équipé de câble de garde
HT	---	Aucune valeur n'est exigée

NOTA: Les lignes 400kV sont équipées de câbles de garde sur toute leur longueur.

2.3.2.3 NOMBRE MAXIMAL DE DEFAUTS DUS AUX AMORCAGES EN RETOUR

Le nombre de défauts dus aux amorçages en retour doit rester inférieur à 0,5 par an et par 100 km pour l'ensemble des circuits.

Ceci est vérifié pour des valeurs de résistance de terre de 10 Ω en 400 kV et 225kV.

2.3.2.4 POSITIONNEMENT DU CABLE DE GARDE

Le positionnement du câble de garde est fait lors de la conception de la famille de pylônes à l'aide du modèle électrogéométrique et est fonction de :

- nombre de défauts d'écran ;
- armement du pylône .

Pour le Maroc, le niveau céramique N_i , qui intervient dans le calcul du nombre de défauts d'écran, est pris égale à 20 (Cf "répartition mondiale des jours d'orages" édité par l'Organisation Météorologique Mondiale - 1969 Genève).

Le nombre de coup de foudre touchant le sol est pris égal à $N_i/6$ (hypothèse EDF adoptée provisoirement en Janvier 1988).

2.3.3 ROLE ET INSTALLATION DES ECLATEURS D'ENTREE DE POSTE

La protection de base du matériel des postes contre les surtensions est constituée par les éclateurs d'entrée de poste .

Impérativement , toute arrivée de ligne aérienne doit être équipée d'éclateurs entre phase et terre .

Ceux-ci sont montés sur les chaînes d'ancrage fixées aux charpentes du poste .

Lorsque l'arrivée est aéro-souterraine , il faut nécessairement installer les éclateurs sur le dernier pylône de la ligne .

Lorsque la ligne comporte un tronçon aéro-souterrain , entre deux tronçons aériens , il est utile également d'installer des éclateurs sur les pylônes supportant les boîtes d'extrémités des câbles .

Les distances de réglage et tensions d'amorçage des éclateurs sont les suivantes :

Tension d'exploitation de la ligne (en kV)	Distance de réglage des éclateurs (en cm)	Tension maximale d'amorçage (kV)	
		au choc de foudre	50Hz
63	28	125	140
90	23	330	185
150	70	500	325
225	23	660	460
400	170	1150	520

NOTA: Pour les lignes 400kV, la distance de réglage est fixée à 1,70 m sur la base de la normalisation EDF en janvier 1988.

COMMENTAIRES

Paragraphe 2.4.1 : L'EFFET COURONNE

Pour plus d'informations sur ce chapitre , voir l'ouvrage de Mr MOREAU

2.4 CONTRAINTES PARTICULIERES DUES A LA TENSION

2.4.1 GENERALITES SUR L'EFFET DE COURONNE

L'effet de couronne désigne l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité d'un gaz dans l'environnement d'un conducteur porté à une très haute tension. En effet le champ électrique provoque l'ionisation du gaz (l'air dans le cas des lignes aériennes).

Si ce champ devient supérieur à un champ dit critique (E_c) il se produit un phénomène d'avalanche électronique qui entraîne l'apparition d'une couronne d'air ionisée autour du conducteur.

L'effet de couronne ou Corona va donc engendrer au niveau des matériels des lignes aériennes soumis à la tension :

- des pertes d'énergie active dites "pertes par effet de couronne" dues au transfert d'énergie entre le conducteur et l'air ambiant ionisé,
- des perturbations radioélectriques dont la source est le déplacement brusque des charges d'espaces entraînées par le champ électrique intense au voisinage immédiat du conducteur ; ce déplacement provoquant un appel de courant de forme impulsionnelle dans le câble ;
- des perturbations acoustiques dues à la superposition aléatoire stationnaire de petits claquements produits par toutes les aigrettes, ces claquements étant, en fait, des ondes de chocs acoustiques émises lorsque les ions, brusquement formés, sont violemment chassés par le champ électrique.

Pour déterminer le champ critique (E_c) sur un conducteur cylindrique à surface lisse, la formule de Peek est souvent utilisée :

$$E_c = E_p \delta \left(1 + \frac{0,308}{\sqrt{r\delta}} \right) \quad \text{avec} \quad \delta = \frac{3,92p}{273 + t}$$

avec :

E_c : valeur du champ critique, (kV/cm)

$E_p = 31$ kV/cm pour l'air

r : rayon du conducteur en centimètres.

p : pression de l'air en cm de mercure

t : température de l'air ambiant en degré celsius

pour $p = 76$ cm Hg et $t = 25^\circ$ C : $\delta = 1$

Toutefois, les conditions pratiques d'utilisation des lignes ne correspondent pas à ces hypothèses théoriques. Le toronnage des conducteurs, les imperfections et les irrégularités de leurs surfaces provoquent des élévations locales du champ électrique et, par conséquent, une tension d'apparition de l'effet de couronne plus basse que celle obtenue avec cette formule.

Ajoutons que, d'une manière générale, les conditions atmosphériques jouent un rôle important. En présence de pluie, de brouillard, de neige, des gouttes d'eau adhèrent à la surface du conducteur et, lorsque la température baisse, de la glace peut s'y former, ce qui réduit davantage la tension d'apparition de l'effet de couronne.

L'expérience montre que pour maintenir les pertes et les nuisances dues à l'effet de couronne à des valeurs acceptables, il convient de limiter le champ superficiel au voisinage des conducteurs à une valeur efficace d'environ 18 kV/cm. Au-delà de 20 kV/cm, les pertes croissent très rapidement.

Pour les lignes T.H.T., cette valeur est généralement comprise entre 13 et 17 kV/cm.

La technique actuelle de limitation du champ superficiel consiste à utiliser des faisceaux de plusieurs conducteurs en parallèle sur chaque phase ce qui permet d'augmenter le rayon fictif du conducteur dans la formule de calcul du champ.

2.4.2 DETERMINATION DES PERTES PAR EFFET DE COURONNE

Les pertes par effet couronne dépendent de nombreux paramètres, : notamment :

- les caractéristiques géométriques de la ligne (armement et hauteurs au dessus du sol),
- du champ électriques à la surface du conducteur,
- des conditions atmosphériques,
- de l'état de surface du conducteur.

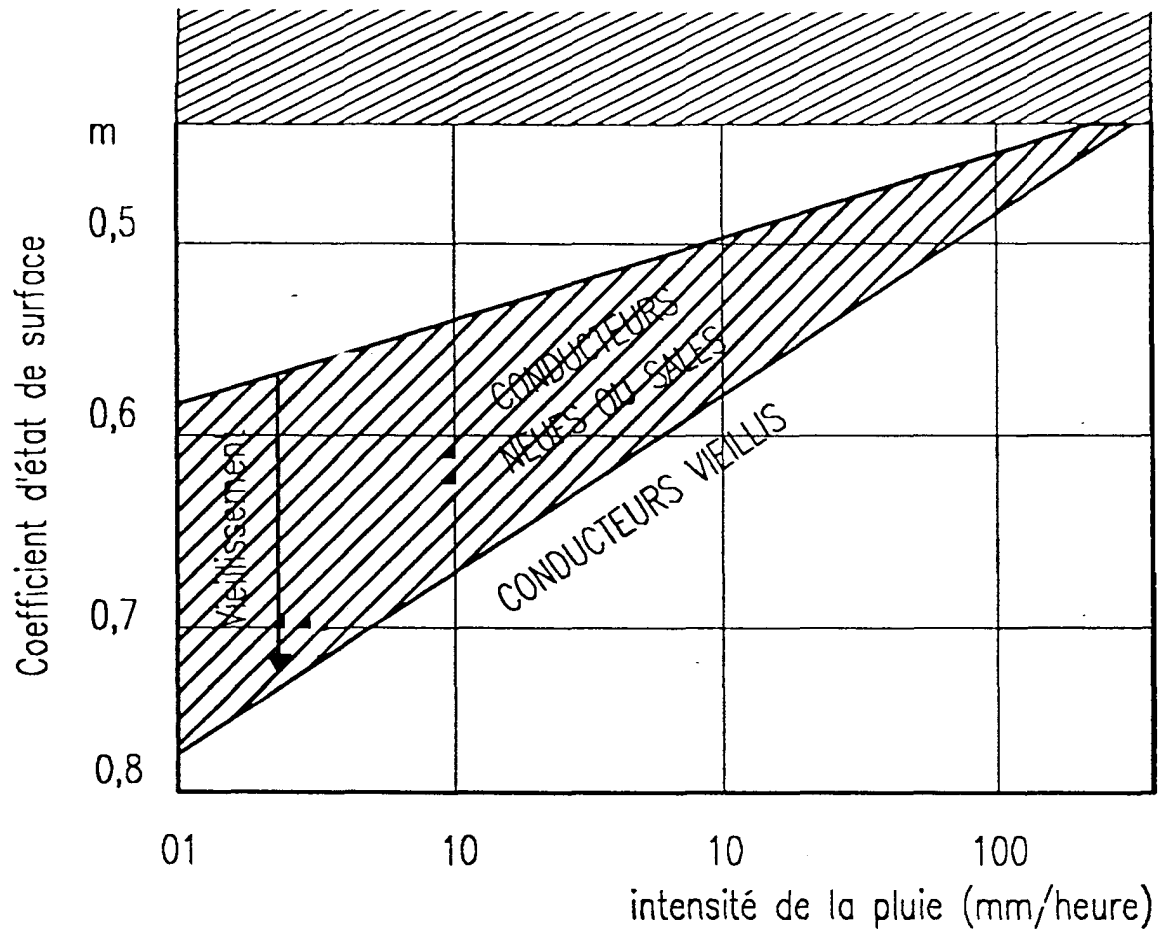
2.4.2.1 METHODE DE DETERMINATION DES PERTES

Puisque la rugosité superficielle diminue le champ critique (E_c), on tient compte de cette influence en attribuant au conducteur un coefficient expérimental $m < 1$, appelé coefficient d'état de surface. Le champ critique E_0 d'un conducteur non poli s'exprime alors sous la forme :

$$E_0 = m E_c$$

Ainsi le toronnage d'un conducteur de ligne aérienne introduit un coefficient d'état de surface de l'ordre de 0,9.

Par ailleurs, on constate que le vieillissement des câbles conduit à une uniformisation des coefficients d'état de surface. Il est alors possible d'établir une corrélation entre l'intensité de la pluie à laquelle sont soumis des conducteurs et le coefficient d'état de surface m qui doit leur être affecté.



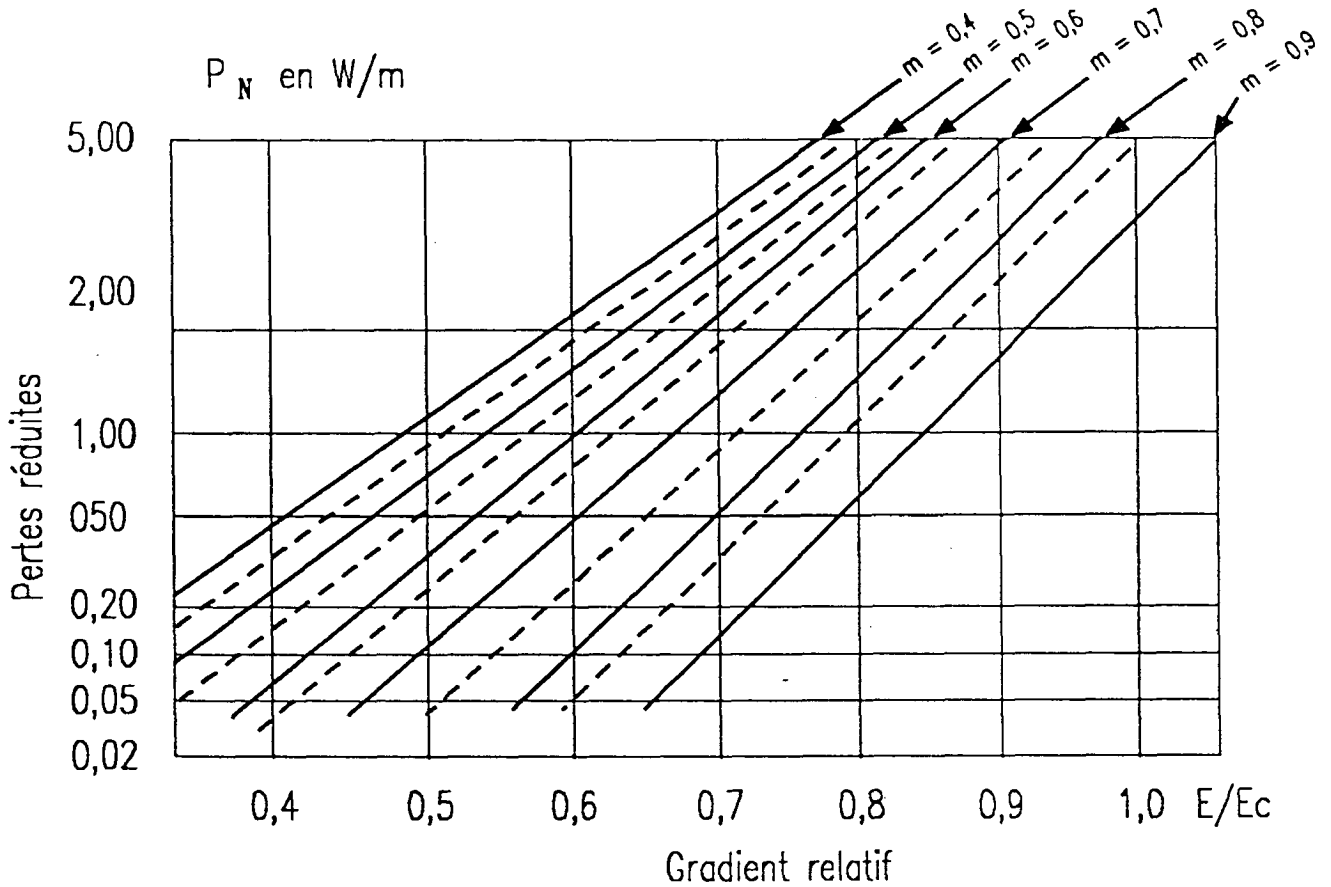
Corrélation état de surface m - intensité de la pluie

L'intensité de la pluie est la moyenne annuelle de la région considéré.

Le vieillissement indiqué sur le graphique ci-dessus représente 5 à 6 années.

Le réseau des pertes réduites P_N représenté sur la figure suivante permet de déterminer les pertes pour un conducteur ou faisceau de conducteurs :

$$P \text{ (W/m)} = K P_N$$



avec :

E : Champ superficiel (kV/cm),

E_c : Champ critique (kV/cm),

$$K = (nr\beta)^2 \frac{\log_{10} \frac{350}{r_e} \times \log_{10} \frac{\rho}{r_e}}{\log_{10} \frac{350}{\rho}}$$

n : nombre de conducteurs du faisceau ,

r : rayon des conducteurs (en cm).

$\beta = 1 + \frac{0,3}{\sqrt{r}}$ facteur de Peek.

r_e : rayon d'un conducteur simple ou rayon équivalent dans le cas d'un faisceau (en cm),

ρ : Coefficient correctif tenant compte du nombre des conducteurs,

$\rho = 18 \sqrt{r}$ pour un conducteur simple,

$\rho = 18 \sqrt{nr + 4}$ pour un faisceau.

En ce qui concerne le champ superficiel à introduire dans le calcul relatif E/E_c , on notera que, dans le cas des faisceaux, c'est le champ superficiel moyen qu'il convient d'utiliser.

On obtient un ordre de grandeur satisfaisant des pertes en effectuant les calculs pour deux valeurs de m :

$m = 0,6$: qui permet d'obtenir la valeur maximale des pertes par forte pluie (seules certaines conditions exceptionnelles, tel que le givre par exemple, peuvent conduire à des pertes légèrement plus importantes).

$m = 0,8$: qui permet d'évaluer les pertes annuelles moyennes .

2.4.3 NIVEAU PERTURBATEUR RADIOELECTRIQUE

2.4.3.1 NIVEAU PERTURBATEUR DES CONDUCTEURS

L'incidence des perturbations sur la qualité des réceptions radioélectriques est due à la superposition d'un bruit radioélectrique et de l'onde porteuse du signal utile. La qualité de la réception ou, si l'on préfère, l'effet perturbateur dépend essentiellement du rapport entre les intensités respectives du signal et du bruit (on dit rapport signal sur bruit).

Selon les recommandations du C.I.S.P.R. (Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques) et en utilisant la méthode CIGRE on peut déterminer le niveau perturbateur par beau temps sec par la relation :

$$NPo = 3.5 Em + 12 r - 30$$

avec :

Em : Champ superficiel maximal du conducteur ou du faisceau en kV_{eff}/cm

r : Rayon du conducteur élémentaire en cm

Cette relation est donnée pour un signal de $1\mu V/m$ placé à 15m de distance et à 2m du sol et à une fréquence de mesure de 0,5 MHz .

Pour une ligne le niveau perturbateur de chaque conducteur est :

$$NPoi = NPo - 33 \log_{10} \frac{Di}{20}$$

avec :

$NPoi$: Niveau perturbateur du conducteur i (en $dB/\mu V$)

Di : Distance du conducteur i par rapport au signal

Effet de l'altitude

L'influence de l'altitude sur le niveau perturbateur est donnée par:

$$NPhi = NPoi + \frac{Q - Q0}{300}$$

avec :

$NPoi$: Niveau perturbateur à l'altitude $Q0$ (soit 2 mètres du sol)

NPhi : Niveau perturbateur à l'altitude Q (en mètres)

Sommation CISPR

si NPhi > 3dB + NPhj : NP = NPhi

si NPhi < 3dB + NPhj : NP = (NPa + NPb)/2 + 1,5 dB

NPa et NPb étant les valeurs les plus élevés parmi le niveau perturbateur de chaque conducteur .

Correction du niveau perturbateur en fonction de la fréquence

Les calculs précédents permettent de déterminer le niveau perturbateur pour une fréquence de 0,5MHz .Pour tenir compte d'une fréquence de mesure autre que 0,5MHz on applique au niveau perturbateur une correction (NPc) fonction de la fréquence réelle à partir des relations suivantes :

Cas d'une ligne en nappe :

$$NPc = NP - (23 \log_{10}F + 12 \log_{10}^2F + 5,8)$$

Cas d'une ligne 2 ternes ou en triangle ou verticale :

$$NPc = NP - (18 \log_{10}F + 12 \log_{10}^2F + 4,3)$$

avec :

NPc : Correction du niveau perturbateur (en dB/μ V)

F : Fréquence de mesure en MHz

Relation entre rapport signal/bruit et qualité de la réception

On prend le dB du signal donné (S) par rapport à 1μV/m

soit : NS (dB) = 20 log₁₀S

Pour évaluer la gêne on procède de la façon suivante :

$$NS - NP = NG \text{ (niveau de gêne)}$$

et on observe sur le tableau suivant la qualité de la réception .

Relations entre le rapport signal sur bruit et la qualité subjective de la réception.			
Rapport signal/bruit			Qualité de la réception
dB	linéaire	Code	* Impression subjective
30	32	5	très bonne : perturbation non audible
24	16	3	correcte : perturbation audible mais perception parfaite de la parole
12	4	2	passable : mauvais pour la musique mais parole intelligible
6	4	2	mauvaise : compréhensible seulement avec effort de concentration
0	1	0	parole inintelligible, brouillage total

Ce tableau est établi pour des auditions de qualité courante fournies par des récepteurs à modulation d'amplitude.

Les codes de qualité 5 et 4 sont définis par des rapports signal/bruit assez précis. Les codes 3 à 0 sont, par contre, de plus en plus subjectifs et les rapports signal/bruit correspondants ne sont donnés ici qu'à titre tout à fait indicatif.

2.4.3.2 NIVEAU PERTURBATEUR DU MATERIEL D'EQUIPEMENT

Le niveau perturbateur du matériel équipant une portée de ligne aérienne doit rester négligeable devant le niveau perturbateur produit par les conducteurs de cette portée.

pour un matériel équipant des lignes dont la tension la plus élevée est supérieure à 170 kV on vérifiera par essais que le matériel soit dans les valeurs admissibles suivantes:

Tension nominale de la ligne (kV)	225	400
Tension perturbatrice (V)	1800	2500
Limite d'une chaîne aux bornes de 300 ohms (dB/μV)	65	68

Pour les lignes de tension inférieure, il suffit, en général, de s'assurer que les pièces métalliques sous tension sont bien au même potentiel, pour ne pas donner lieu à des micro-arcs. Cette équipotentialité est assurée normalement si les raccordements boulonnés sont correctement serrés. Dans le cas d'articulation, lorsque la pression n'est pas suffisante pour assurer un auto-nettoyage, il peut être nécessaire de relier entre elles les parties métalliques par un petit shunt.

2.4.4 NIVEAU PERTURBATEUR ACOUSTIQUE

Les perturbations acoustiques apparaissent fréquemment pendant les périodes de mauvais temps et de brouillard. Par beau temps, elles se manifestent le plus souvent pour des lignes soumises à une forte pollution.

2.4.4.1 NIVEAU DU BRUIT ACOUSTIQUE - RELATION EMPIRIQUE

Une relation empirique permet d'évaluer le niveau de bruit acoustique, sous forte pluie, dû à une seule phase.

Cette relation est la suivante :

$$AN = AN_b + 0,45d + 15\text{Log}n - 10\text{Log}D$$

avec :

AN : gêne acoustique (dBA)

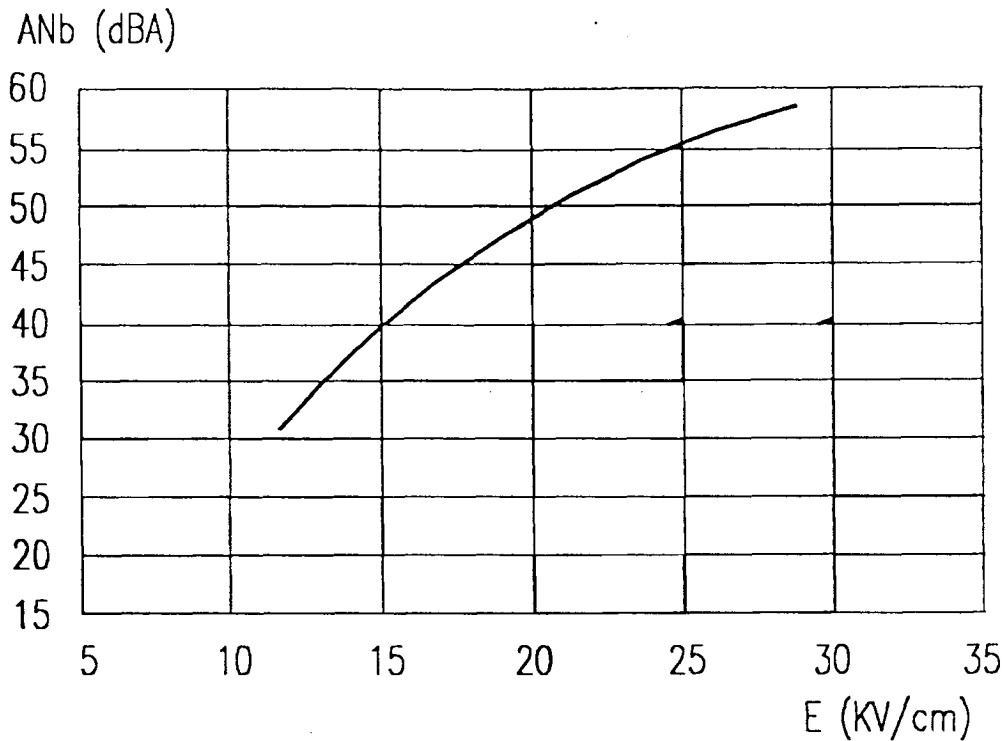
d : diamètre des conducteurs constituant le faisceau (mm)

n : nombre de conducteurs du faisceau

D : distance du faisceau au point de mesure (m)

AN_b : niveau du bruit (dBA) obtenu en fonction de la valeur efficace du champ électrique E, en kV/cm, autour du faisceau.

Sur la figure suivante , on trouvera la courbe $AN_b = f(E)$ permettant de déterminer ce niveau.



Cette formulation est relative à une seule phase, or il est plus difficile d'estimer l'augmentation de l'effet de gêne ressentie lorsque l'on passe du bruit généré par un système monophasé à celui produit par un système polyphasé. On estime actuellement que le fait de considérer un système triphasé augmente le niveau de bruit d'environ + 3,5 dBA par rapport à celui calculé pour un système monophasé.

2.5 CONTRAINTES DUES AU COURANT - ECHAUFFEMENT

2.5.1 GENERALITES

Les pertes par effet Joule dues au passage du courant entraînent un échauffement des câbles, des matériels de jonction et des mises à la terre. Il convient donc de limiter cet échauffement afin d'éviter :

- d'importantes diminutions des caractéristiques mécaniques des matériels (vieillessement des câbles, des manchons de jonction ou d'ancrage, etc)
- de fortes augmentations de la flèche des conducteurs au-dessus du sol et des constructions.

Pour calculer les intensités maximales imposées par les températures limites à ne pas dépasser, il est nécessaire de définir les régimes de fonctionnement auxquels peuvent être soumises les lignes aériennes.

Dans les paragraphes suivants, on détaille les caractéristiques de ces différents régimes ainsi que les méthodes retenues pour évaluer les intensités correspondantes.

2.5.1.1 REGIMES DE FONCTIONNEMENT A CONSIDERER

Deux régimes de fonctionnement sont considérés pour l'étude de l'échauffement des conducteurs :

- . régime permanent,
- . régime de surcharge temporaire,

2.5.1.1.1 RÉGIME PERMANENT

= C'est le régime de fonctionnement pour lequel l'équilibre thermique est atteint ; la température du conducteur et le transit étant considérés constants.

La détermination de la température du conducteur est obtenue à l'aide de la formule qui tient compte des puissances suivantes :

- P_j : Puissance apportée par effet joule (W/m)

$$P_j = I^2 \cdot R_o \cdot [1 + k \cdot (\theta_e - 293,15)]$$

- P_s : Puissance reçue par rayonnement solaire (W/m)

$$P_s = \alpha \cdot S_i \cdot d$$

- P_c : Puissance évacuée par convection forcée (W/m)

$$P_c = 8,55 \cdot (\theta_e - \theta_a) \cdot (v \cdot d)^{0,448}$$

- P_r : Puissance émise par rayonnement dans l'infra rouge (W/m)

$$P_r = E \cdot S \cdot \pi \cdot d \cdot (\theta_e^4 - \theta_a^4)$$

Soit : $P_j + P_s = P_c + P_r$

$$I^2 \cdot R_o \cdot [1 + k \cdot (\theta_e - 293,15)] + \alpha \cdot S_i \cdot d = 8,55 \cdot (\theta_e - \theta_a) \cdot (v \cdot d)^{0,448} + E \cdot S \cdot \pi \cdot d \cdot (\theta_e^4 - \theta_a^4)$$

Les notations utilisées sont les suivantes :

- I est l'intensité transitant dans le conducteur (A),
- R_o est la résistance linéique (Ω/m) du conducteur à 20°C (effet de peau compris),
- k est le coefficient de température de la résistance à masse constante égal à :
 - 0,0040 par degré Celsius pour l'aluminium ,
 - 0,0036 par degré Celsius pour l'alumélec ,
- θ_e est la température d'équilibre du conducteur (°K)
- α est le coefficient de réceptivité solaire du conducteur vis-à-vis du flux solaire (0,5) ,
- S_i est la composante du rayonnement solaire
 - $S_i = 900$ pour le Maroc, perpendiculaire au conducteur (W/m^2)
- d est le diamètre du conducteur (m),

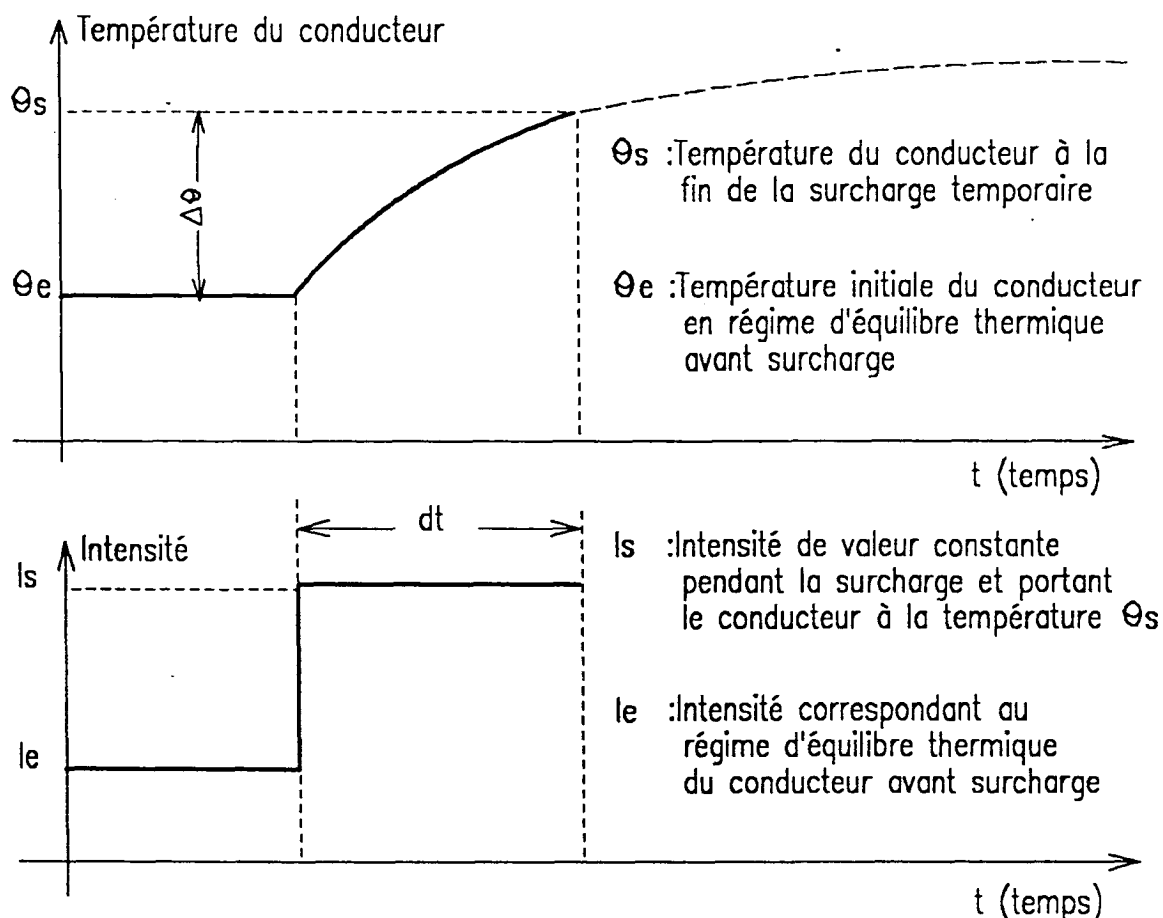
- θ_a est la température ambiante ($^{\circ}\text{K}$), (température du conducteur pour $I=0$)
- v est la vitesse de l'air ambiant (m/s) $v = 1\text{m/s}$,
- E est le pouvoir émissif par rapport au corps noir (0,6) ,
- S est la constante de STEFAN égale à $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}^4$

2.5.1.1.2 RÉGIME DE SURCHARGE TEMPORAIRE

L'obtention de ce régime suppose que plusieurs circonstances défavorables soient réunies simultanément, à savoir :

- qu'il y ait avarie d'un ouvrage ,
- que cette surcharge se produise sur une ligne déjà chargée à son intensité maximale en régime permanent et atteigne sa valeur maximale pendant une durée de 20mn .

La durée de 20mn est définie par convention . Elle correspond au temps nécessaire à l'exploitant pour éliminer la surcharge .



Le bilan énergétique par unité de longueur du conducteur pendant la période dt s'écrit, si la température augmente de $d\theta$ pendant ce temps en fonction des énergies suivantes :

E_c : énergie thermique emmagasinée pour un échauffement $d\theta$ par le conducteur pendant un temps dt (W/m)

$$E_c = S.M_c.C.d\theta$$

E_j : énergie joule (W/m)

$$E_j = I^2.R_0.[1 + k(\theta_s - 293,15)]dt$$

E_s : énergie solaire reçue (W/m)

$$E_s = \alpha.S_i.d.dt$$

E_e : énergie évacuée à la surface du conducteur (W/m)

$$E_e = \pi.d.\gamma.[\theta_s - \theta_e].dt$$

soit $E_c = E_j + E_s - E_e$

$$S.M_c.C.d\theta = I^2.R_0.[1 + k(\theta_s - 293,15)]dt + \alpha.S_i.d.dt - \pi.d.\gamma.[\theta_s - \theta_e].dt.$$

où :

S : section du conducteur (m²),

M_c : masse volumique du métal composant le conducteur (kg/m³),

C : chaleur massique de ce métal à la température de 20°C (J/kg.°C),

γ : coefficient d'échange propre du conducteur.

θ_s : température du conducteur à la fin de la surcharge temporaire (°C)

θ_e : température initiale du conducteur en régime d'équilibre thermique avant surcharge (°C)

2.5.2 ECHAUFFEMENT DES CONDUCTEURS EN REGIME ETABLI

2.5.2.1 TEMPERATURES AMBIANTES

La température extérieure ambiante peut varier de 0 à 45 ° C

2.5.2.2 REGIME PERMANENT

L'exploitation des lignes aériennes doit assurer le respect de conditions limites pour la température des conducteurs, fixées à :

60°C en régime permanent

2.5.2.3 REGIME DE SURCHARGE TEMPORAIRE

Pendant ces courtes durées, la température des conducteurs peut atteindre 70°C.

Cette température définit la température dite de répartition et pour laquelle les hauteurs de surplomb doivent être respectées .

2.5.2.4 INTENSITES ADMISSIBLES

A partir des formules précédentes et pour des températures ambiantes variants de 0 à 45 ° C on peut déterminer les intensités admissibles pour chaque type de conducteurs .

Pour les câble usuels, voir chapitre Câbles , 2ème partie des directives LHT.

2.6 CONTRAINTES DUES AU COURANT INDUCTION

2.6.1 INDUCTION DANS LES CIRCUITS DE TELECOMMUNICATION

Les circuits de télécommunication (lignes de télécommunication, circuits O.N.C.F., réseaux de transmission de signaux, circuits de transmission de signaux, circuits de télécommande ou de télésignalisation industriels) sont le siège d'une force électromotrice induite, lorsqu'il se produit un défaut monophasé à la terre sur une ligne de transport d'énergie située à proximité.

Au moment de l'étude d'un projet de ligne, on doit évaluer la force électromotrice induite dans les circuits de télécommunication existants conformément à l'article 66 de l'Arrêté Technique du 15 Mars 1963.

2.6.2 DIRECTIVES ET GUIDES DU C.C.I.T.T.

La méthode de calcul et les conditions à respecter sont indiquées dans les Directives du Comité Consultatif International Télégraphe et Téléphone (C.C.I.T.T. Assemblée de NEW DELHI de 1960):

- seul, le phénomène d'induction magnétique est à considérer, pour les réseaux dont le neutre est mis à la terre directement ou par l'intermédiaire d'une impédance limitative faible. Cette condition est toujours respectée pour les lignes de tension égale ou supérieure à 63 kV ;

- la valeur de la tension longitudinale induite dans les conducteurs d'une ligne de télécommunication en fils nus aériens doit être inférieure à 650 volts, lorsque la ligne électrique est à grande sécurité de service.

Cette valeur ne s'applique pas aux câbles de télécommunication aériens ou souterrains et varie, dans ce cas, avec les caractéristiques du câble et les conditions d'installation ; elle peut être, soit égale à 650 Volts ou 430 Volts, soit égale à 60 % de la tension de claquage de l'enveloppe du câble (se renseigner auprès de l'autorité responsable des circuits).

La définition des lignes à grande sécurité de service est indiquée dans l'Arrêté Technique du 15 Mars 1963.

Le calcul pour l'évaluation de l'induction sera effectué conformément aux indications du Guide d'application des Directives du C.C.I.T.T. joint en annexe 3 aux présentes Directives LHT.

2.7 CONTRAINTES ELECTRIQUES DANS LES CANALISATIONS

2.7.1 CONDITIONS A RESPECTER ET PHENOMENES A CONSIDERER

Des dispositions doivent être prises, en cas de voisinage d'une ligne électrique de troisième catégorie et d'une canalisation de transport de fluide, pour éviter le claquage du revêtement protecteur de la canalisation et le franchissement électrique des joints isolants, lorsqu'il se produit un court-circuit monophasé à la terre sur la ligne électrique.

On admet que la contrainte est égale à la somme arithmétique des valeurs efficaces des différences de tension provenant des phénomènes suivants :

- induction magnétique provoquant une élévation du potentiel de la canalisation par rapport au sol : V_i
- conduction due à l'écoulement du courant de défaut par la prise de terre d'un pylône et provoquant une élévation du potentiel du sol voisin de la canalisation par rapport au potentiel du métal : V_x

d'où : $V \text{ totale} = V_x + V_i$

En pratique, la tension maximale à laquelle peut être soumis l'isolement d'une canalisation de transport de fluide est fixée à 5 000 Volts.

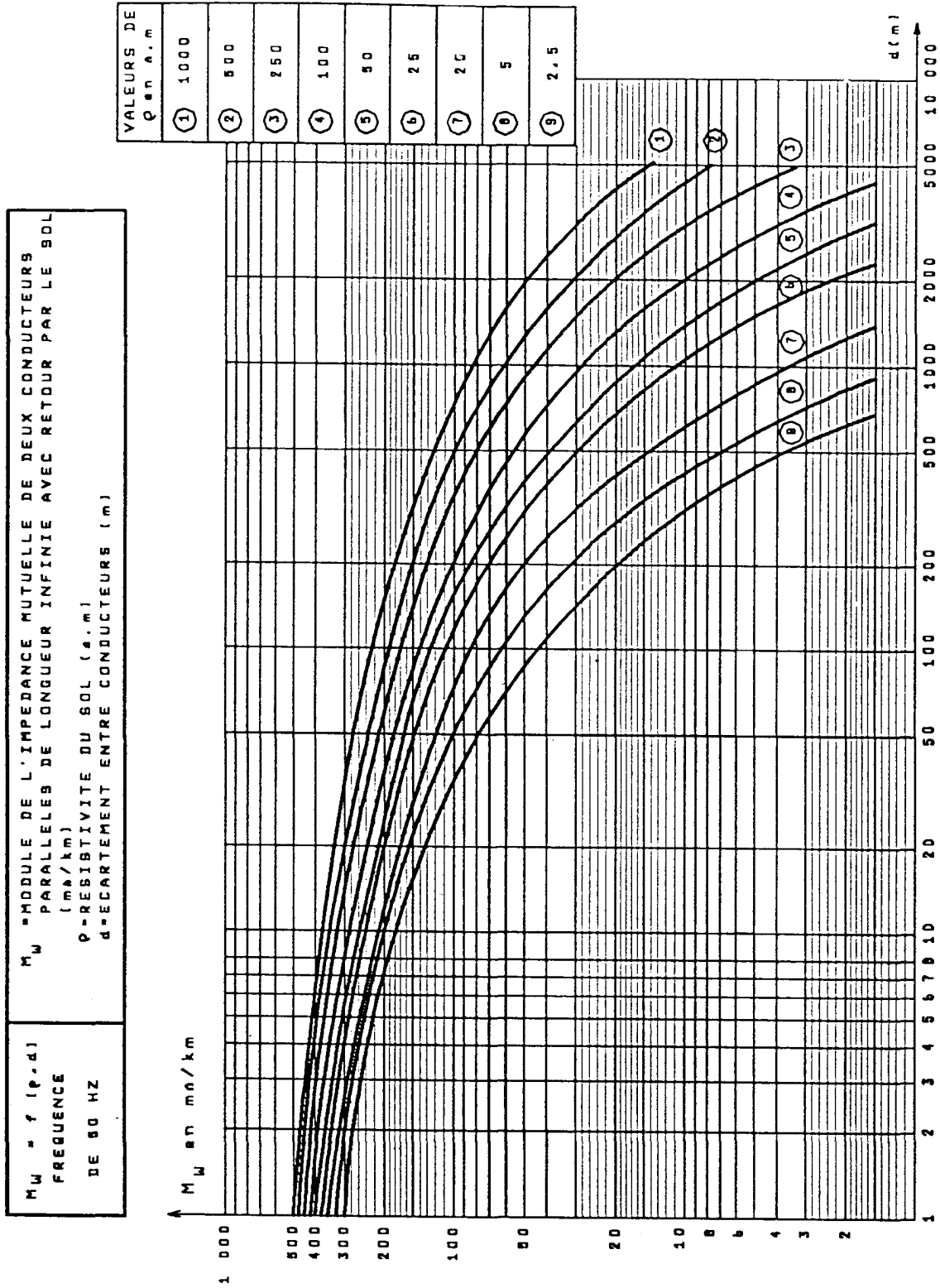


Figure 1. Impédance mutuelle entre deux conducteurs

REGLES DE CALCUL ELECTRIQUE

TABLEAU DES ORDRES DE
GRANDEUR DES RESISTIVITES
DE DIVERS TERRAINS

NATURE DU TERRAIN	RESISTIVITE ρ ($\Omega \cdot m$)
SCHISTES GRAPHITIQUES	DE L'ORDRE DE 1 A 35
TERRAINS MARECAGEUX	DE QUELQUES UNITES A 30
LIMON	20 A 100
HUMUS	10 A 150
TOURBE HUMIDE	5 A 100
ARGILES ET MARNO-CALCAIRES	10 A 200
ARGILE PLASTIQUE	50
MARNES ET ARGILES COMPACTES	100 A 200
MARNES DU JURASSIQUE	30 A 40
SABLES ET GRAVIERS	50 A 3000 ET PLUS
SABLE ARGILEUX	50 A 500
SABLE SILICEUX	200 A 3000
SOL PIERREUX NU	1500 A 3000
SOL PIERREUX RECOUVERT DE GAZON	300 A 500
GALETS, BLOCS DE SILEX	1000 A 10 000 ET PLUS
CALCAIRES	100 A 5000 ET PLUS
CALCAIRES TENDRES	100 A 300
CALCAIRES COMPACTS	1000 A 5000
CALCAIRES FISSURES	500 A 1000
SCHISTES	50 A 300 ET PLUS
MICASCHISTES	DE L'ORDRE DE 800
GRES	100 A 10 000 ET PLUS
ROCHES ERUPTIVES	300 A 10 000 ET PLUS
GRANITES DE VIRE	300 A 500
GRANITES DE LA TRUYERE SUIVANT ALTERATION	10 000 A 15 000
GRANITES DE LA DORDOGNE SUIVANT ALTERATION	1500 A 10 000
GRANITES TRES ALTERES	100 A 600
BASALTES, ANDESITES	800 A 10 000 ET PLUS
TUFS SILICIFIES	20 000 ET PLUS

Figure 2. Résistivité des sols