

# Postes à haute et très haute tensions

## Construction et équipements

<b>1. Implantation</b> .....	D 4 575 — 2
<b>2. Génie civil</b> .....	— 2
2.1 Plate-forme.....	— 3
2.2 Voies de circulation .....	— 4
2.3 Fondations des supports d'appareils.....	— 4
2.4 Ouvrages pour transformateurs de puissance .....	— 5
2.5 Bâtiments .....	— 6
2.6 Clôtures .....	— 7
2.7 Caniveaux de câbles à basse tension .....	— 7
<b>3. Réseau général de terre</b> .....	— 7
3.1 Rôle d'une mise à la terre .....	— 7
3.2 Principe de conception d'un réseau de terre de poste .....	— 8
3.3 Réalisation pratique.....	— 8
3.4 Protection contre la foudre .....	— 9
3.5 Raccordement des différents équipements au réseau de terre.....	— 9
3.6 Dispositions particulières.....	— 10
<b>4. Charpentes des postes</b> .....	— 10
4.1 Types de charpentes .....	— 10
4.2 Conception .....	— 10
4.3 Choix du matériau et protection contre la corrosion.....	— 10
4.4 Calcul des charpentes.....	— 11
<b>5. Matériels à haute tension</b> .....	— 11
5.1 Sectionneurs .....	— 11
5.2 Disjoncteurs .....	— 12
5.3 Transformateurs de mesure .....	— 13
5.4 Condensateurs de couplage des équipements à haute fréquence et des circuits bouchons.....	— 13
5.5 Transformateurs de puissance .....	— 13
5.6 Parafoudres .....	— 13
<b>6. Isolateurs et supports isolants</b> .....	— 13
6.1 Chaînes isolantes.....	— 13
6.2 Supports isolants.....	— 13
<b>7. Connexions aériennes</b> .....	— 14
7.1 Connexions aériennes en câbles.....	— 14
7.2 Connexions aériennes en tubes .....	— 16
7.3 Mise en œuvre des connexions aériennes et des raccords .....	— 17
<b>8. Liaisons souterraines</b> .....	— 18
<b>Pour en savoir plus</b> .....	Doc. D 4 575

**L**es postes à haute et très haute tensions (HT et THT) font l'objet de plusieurs dossiers :

- Rôle et structure [D 4 570] ;
- Dispositions constructives [D 4 572] ;
- Construction et équipements [D 4 574] ;
- Installations de conduite et de contrôle [D 4 576] ;
- Postes sous enveloppe métallique (PSEM) [D 4 590].

Les sujets traités n'étant pas indépendants les uns des autres, le lecteur est donc invité à se reporter aussi souvent que nécessaire aux autres dossiers.

## 1. Implantation

La décision de construire un nouveau poste est avant tout dictée par des besoins essentiellement techniques. Une fois cette décision prise, le problème qui se pose est de trouver, le plus près possible du point électrique idéal, un terrain suffisamment grand pour y construire le poste, et permettre l'arrivée et le départ des lignes.

Le plus intéressant est d'installer le futur poste sur un site proche des couloirs des lignes existantes, voire si possible à leur intersection.

Lorsqu'il est impossible de trouver un tel emplacement, le choix du terrain résulte alors d'un compromis harmonieux entre des facteurs techniques, économiques, administratifs et environnementaux.

Le tableau 1 montre l'influence sur le projet et les conséquences des principaux facteurs à prendre en compte.

## 2. Génie civil

Avant tous travaux, les terrains doivent être étudiés, aménagés et préparés.

L'équipement électrique des postes nécessite une infrastructure composée d'une plate-forme, de routes, pistes, aires de manutention, de fondations supports de charpentes et de matériels électriques, de bâtiments, de clôtures et d'ouvrages divers, l'ensemble constituant le génie civil de ces postes.

Les problèmes d'exploitation sont très présents dans la conception du génie civil. Au cours des années, l'évolution des matériels et des techniques d'exploitation a entraîné des modifications nombreuses du génie civil pour faciliter l'exploitation des ouvrages.

L'étude du génie civil d'un poste commence par une appréciation aussi précise que possible des caractéristiques du sol, le but visé étant de calculer et de réaliser l'ensemble des ouvrages de génie civil dans les meilleures conditions économiques.

La reconnaissance complète des terrains est confiée à des organismes spécialisés. L'objectif est d'obtenir des renseignements d'ordre topographique (limites cadastrales, relief) et physique (caractéristiques géologiques et mécaniques des différentes couches composant le sol, présence éventuelle d'eau, etc.).

Une fois les renseignements obtenus, les ouvrages peuvent être dimensionnés et exécutés.

**Tableau 1 – Facteurs pour l'implantation d'un poste**

Caractéristiques du site	Influence sur le projet	Conséquences principales
Terrain disponible	Disposition des installations	Coût du terrain
Topographie	Nombre de plates-formes	Volume de terrassement
Caractéristiques géologiques et géotechniques du sol	Fondation et réseau de terre	Surcoût sur fondations
Hydrologie	Influence minimale	Coût d'un drainage
Accès	Influence minimale	Surcoût de construction
Couloirs des lignes	Orientation et disposition des installations	Coût des liaisons et influence sur la fiabilité
Pollution	Distance d'isolement Encrassement, nettoyage Durée de vie	Coût sur équipements et influence sur la fiabilité
Environnement	Dispositions architecturales Changement du type de poste	Coûts des aménagements paysagers Surcoût pour les bâtiments et les équipements
Sismologie	Dispositions particulières	Coût des équipements des structures et des fondations
Altitude	Augmentation des distances électriques Surcharges climatiques Augmentation du refroidissement et de la ventilation	Coûts des équipements

## 2.1 Plate-forme

### 2.1.1 Nivellement. Terrassement

Les travaux débutent par le décapage de la terre végétale. Si sa qualité le permet, celle-ci est stockée en vue de sa réutilisation pour des aménagements paysagers d'espaces verts, de plus en plus fréquents. Vient ensuite le nivellement du terrain, c'est-à-dire la réalisation d'une plate-forme sur laquelle seront implantés les ouvrages.

L'utilisation de charpentes et de raccords de jeux de barres normalisés implique des plates-formes ne présentant généralement pas une pente supérieure à 5 % dans les deux sens : parallèle et perpendiculaire aux jeux de barres.

Si les dénivellations du terrain naturel sont trop importantes pour éviter des mouvements de terre de grande ampleur, on est alors conduit à réaliser plusieurs plates-formes distinctes, sur lesquelles seront répartis les différents éléments du poste.

Les terrassements sont réalisés en s'efforçant de minimiser les mouvements de terre. Le nivellement est donc calculé, dans la mesure du possible, suivant le critère :

$$\text{remblais} = \text{déblais}$$

afin d'éviter le transport de terre à la décharge publique. L'utilisation des déblais en remblais reste soumise aux conditions du rapport de sol du géotechnicien.

### 2.1.2 Traitement de sol

Certains sols, en raison de leurs propriétés et/ou de leur teneur en eau, sont considérés comme des matériaux mauvais ou médiocres et sont le plus souvent remplacés par d'autres de meilleure qualité, entraînant un coût important.

Une solution technique, avantageuse économiquement pour régler les problèmes posés, peut être le traitement de ces sols, soit à la chaux, soit au ciment, voire aux deux.

Le **traitement à la chaux** permet :

- de diminuer la teneur en eau du terrain ;
- d'améliorer les caractéristiques à court et long termes de certains sols (limoneux ou argileux) de qualité médiocre dans leur état naturel, permettant ainsi leur réemploi éventuel en remblais ;
- d'exécuter les terrassements dans les meilleures conditions de travail possibles, tout en diminuant la sensibilité du chantier aux intempéries.

L'objet du **traitement au ciment** est sensiblement identique à celui du traitement à la chaux (amélioration des caractéristiques initiales des sols), mais il est surtout utilisé dans le but d'obtenir un développement rapide et durable des résistances mécaniques et des stabilités du terrain à l'eau et au gel. C'est pourquoi le procédé est utilisé le plus souvent pour la réalisation de couches de forme sous les routes et les pistes.

Le **traitement mixte**, à la chaux et au ciment, est essentiellement utilisé en couche de forme. Il peut en effet arriver que certains sols fins ne soient pas aptes à supporter un traitement au ciment seul (teneur en eau ou cohésion trop élevées). Le traitement préalable à la chaux, par les actions immédiates de celle-ci, permet d'amener le sol à un état optimal pour le traitement au ciment.

Le traitement du sol, par l'une de ces techniques, doit faire l'objet d'une étude spécifique, pilotée par le géotechnicien, qui s'intègre dans l'étude générale de sol nécessaire à définir les terrassements, le drainage, les massifs et les pistes.

### 2.1.3 Drainage

Le drainage a pour objectif d'assainir les sols trop humides en favorisant l'écoulement de l'eau retenue en excès dans les terres. Il consiste à collecter et à évacuer le plus vite possible les eaux provenant des agents atmosphériques (pluie, neige, grêle) et qui circulent à la surface du sol. Il permet ainsi d'éviter les actions néfastes provoquées par la stagnation de l'eau sur le sol et sur les ouvrages.

La conception d'un réseau de drainage d'un poste doit obéir à un certain nombre de principes, dont certains relèvent simplement du bon sens :

- il est tout d'abord nécessaire de délimiter la zone à drainer (*bassin versant*) ; ce sera la surface du poste si celui-ci est entouré d'un fossé périphérique captant et évacuant les eaux de ruissellement extérieures. Dans le cas contraire, l'ensemble du bassin versant général environnant devra être pris en compte ;
- la réalisation du réseau de drainage suppose l'existence d'exutoires (fossés, ruisseaux, rivières, etc.). Si ceux-ci s'avèrent insuffisants pour évacuer le débit maximal du réseau, il est alors indispensable de créer un bassin tampon servant à stocker temporairement le trop-plein ;
- une légère pente sur la ou les plates-formes permet d'assurer une évacuation naturelle des eaux de ruissellement et évite ainsi les problèmes dus à la stagnation.

Le réseau de drainage est composé de drains principaux dans lesquels viennent se jeter des drains secondaires disposés en antennes.

La méthode de dimensionnement du réseau de drainage fait appel à plusieurs facteurs :

- la pluviométrie de la région ;
- la topographie du site ;
- la période de retour de l'événement atmosphérique (en général la pluie).

Les drains suivent habituellement la pente de la plate-forme, et ont une pente minimale de 4 % si celle-ci est horizontale. Ils sont positionnés en amont des ouvrages de génie civil (pistes, caniveaux, bâtiments, etc.) et à une profondeur si possible hors gel. Ils sont généralement constitués d'une buse en plastique perforée sur son demi-périmètre supérieur, entourée de gravillons, le tout enrobé d'un tissu protecteur dénommé géotextile évitant tout colmatage ultérieur.

Le drainage est habituellement réalisé après le nivellement du terrain.

Cependant, dans certains cas particuliers, il peut être nécessaire d'effectuer en début de chantier un drainage provisoire afin d'assainir le lieu de travail et de faciliter l'évolution des engins de terrassement. Ce drainage superficiel est alors réalisé au moyen de petites tranchées remplies de gravillons. Le drainage définitif est, quant à lui, exécuté ultérieurement.

### 2.1.4 Aménagement de surface

Sur l'ensemble de la surface du poste, les **zones construites**, où se situent les ouvrages et matériels, sont recouvertes d'une couche de gravillons concassés 15/25 (dimension comprise entre 15 et 25 mm) d'une épaisseur de 7 cm.

Le rôle de ce gravillonnage est double :

- avant tout, il participe, dans le cadre de la conception générale du réseau de mise à la terre du poste (§ 3), à l'amélioration de la sécurité des personnes, en limitant le courant circulant dans le corps humain lors d'un défaut électrique ; la présence d'une couche de 7 cm de gravillons permet de réduire cette intensité de courant d'un facteur supérieur à deux ;
- il facilite les déplacements au voisinage des installations et présente une surface plus propre.

Le choix de la nature et de la couleur du gravillon est effectué en fonction des carrières environnantes.

Avant épandage des gravillons, il est indispensable d'arroser les surfaces à gravillonner avec un produit désherbant non toxique et non corrosif pour le cuivre du circuit de terre. Cette application ne doit cependant pas risquer de polluer les nappes phréatiques proches du sol ou ruisseler dans les terrains cultivés contigus. Une deuxième application sera faite après gravillonnage.

Le reste de la parcelle, libre d'installations, sera aplani.

## 2.2 Voies de circulation

### 2.2.1 Route d'accès et routes intérieures

Un tronçon routier appelé route d'accès relie le poste à desservir depuis son portail d'entrée jusqu'à la voie publique.

Une ou plusieurs routes intérieures au poste permettent ensuite aux différents véhicules d'accéder aux bâtiments, aux cellules de transformateurs de puissance et aux lieux de déchargement ou de stockage des matériels. Elles assurent également la liaison avec les pistes (§ 2.2.2) et les aires de manutention (§ 2.2.3).

La largeur de la chaussée est déterminée en fonction de celle des essieux des véhicules les plus encombrants, en prenant de part et d'autre une sécurité de 0,50 m. Une largeur de 4,50 m est généralement adoptée.

La charge maximale par ligne d'essieu pour les convois utilisés actuellement est de l'ordre de 15 t pour une pression des pneus de 0,9 MPa.

Les routes peuvent être construites selon deux techniques :

- une **chaussée souple**, constituée par un empilage de matériaux pierreux distincts, disposés en couches, recouvert d'un revêtement à base de goudron ou de bitume ;
- une **chaussée rigide**, composée de dalles en béton armé de 18 cm d'épaisseur, reposant sur une ou plusieurs couches de matériaux (en fonction de la qualité du sol sous-jacent) qui assurent une assise convenable à ces dalles.

### 2.2.2 Pistes

Les pistes de circulation forment un réseau routier secondaire intérieur au périmètre de l'ouvrage et permettent d'accéder aux cellules des installations à haute tension.

Les véhicules qui doivent circuler sur ces pistes sont ceux utilisés pour le transport et la manutention de l'appareillage, à savoir des camions, des camionnettes et des grues automotrices.

La largeur des pistes est déterminée en fonction de l'empattement de ces véhicules en tenant compte d'une surlargeur de sécurité de 0,35 m de part et d'autre ; on obtient ainsi une largeur de 3,20 m.

Les pistes sont réalisées pour une charge de 10 t par essieu avec une pression des pneus de 0,75 MPa. Elles sont construites suivant la technique de la chaussée rigide (§ 2.2.1) mais avec des dalles de béton armé moins épaisses (12 cm).

### 2.2.3 Aires de manutention

Elles sont disposées en antennes des pistes et situées entre les phases des cellules à haute tension. Elles servent à l'évolution des engins utilisés pour la manutention des appareils (disjoncteurs, transformateurs de mesure, etc.), et lors des opérations d'entretien ou de réparation.

Elles sont exécutées selon les mêmes spécifications que les pistes de circulation (§ 2.2.2).

## 2.3 Fondations des supports d'appareils

Les structures métalliques, destinées à supporter l'appareillage à haute et très haute tensions ou les connexions tendues dans les postes, sont fixées au sol par l'intermédiaire de fondations massives en béton que l'on appelle communément **massifs**.

On distingue généralement :

- les massifs des **charpentes principales**, qui sont les portiques d'ancrage des lignes aériennes et des connexions tendues en câbles du poste. Les efforts appliqués varient selon la disposition des arrières de lignes ;

- les massifs des **charpentes secondaires**, qui sont les châssis supports d'appareillage à haute et très haute tensions ou de colonnes isolantes. Les efforts exercés sont connus et bien déterminés.

Les sollicitations sur les massifs sont calculées à partir des efforts qui s'appliquent sur les appareillages (§ 4.4.1) : charges statiques (charges permanentes, surcharges climatiques), surcharges électrodynamiques, charges de construction et d'entretien.

Le type de massif de fondation est également fonction des caractéristiques du terrain. Bien qu'aucune règle générale ne puisse être énoncée en ce qui concerne le type de fondation à employer, quelques idées directrices peuvent néanmoins être données :

- pour les terrains de bonne résistance (pression admissible en fond de fouille de 0,1 à 0,6 MPa), les dimensions des bases des poteaux conduisent en général à adopter des massifs du type « fondations massives », de forme parallélépipédique ou comportant à la partie inférieure une semelle de répartition ;

- pour les terrains de faible résistance (pression admissible en fond de fouille < 0,1 MPa) et les terrains très résistants (> 0,6 MPa), le type « fondations massives » n'est vraisemblablement pas le mieux adapté ni le plus économique ; il est alors nécessaire de rechercher un type de fondation différent tel que pieux, radiers, réseaux de longrines ou, au contraire, ancrages réduits dans le rocher.

Du point de vue du principe de calcul, ces massifs sont sollicités **au renversement**. Lorsque l'on considère des sollicitations dans une seule direction, il est préconisé d'utiliser pour dimensionner les massifs parallélépipédiques la méthode dite du réseau d'état [1]. Cette dernière tient compte de la poussée et de la butée des terres sur les faces perpendiculaires à la direction des efforts considérés, ainsi que de la réaction présentée par le terrain sous-jacent. En revanche, elle ne tient pas compte du frottement des terres sur les faces latérales. Dans le cas de sollicitations simultanées dans deux directions perpendiculaires, elle est complétée par la méthode de M.L. Hahn [2] relative aux contraintes maximales exercées sur le fond de fouille.

Le principe de cette méthode est de vérifier deux conditions :

- la stabilité au renversement ;
- la pression maximale en fond de fouille.

Les poteaux de charpente sont reliés au massif par l'intermédiaire de platines horizontales situées à leur base (figure 1). Ces platines sont fixées sur des tiges communément appelées **crosses**, préscellées dans le béton du massif, mises en place à l'aide d'un gabarit pendant le coulage, et filetées à leur extrémité supérieure. Le réglage de verticalité de l'axe de la charpente s'effectue par un écrou situé sur la platine et serré sur le filetage. Les écrous supérieurs assurent le blocage.

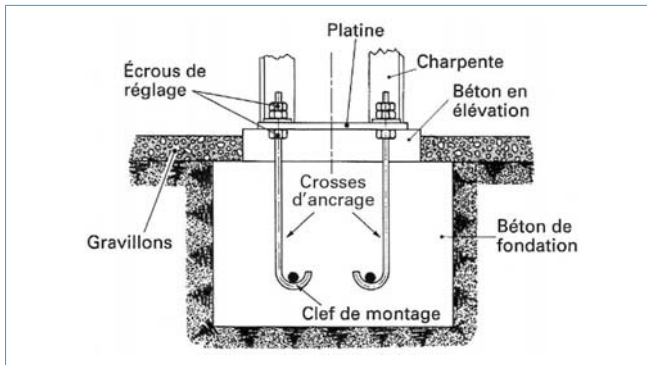


Figure 1 – Massif et fixation des platines de charpentes

## 2.4 Ouvrages pour transformateurs de puissance

### 2.4.1 Massifs de repos

Les massifs de repos sont déterminés par le mode de maintenance, les dispositions constructives des transformateurs (§ 5.5) et le respect des distances minimales au sol des parties sous tension.

Deux types de dispositions constructives existent :

— pour les transformateurs équipés de galets de roulement, en nombre variable suivant l'importance de la charge (autotransformateurs 400 kV/225 kV et transformateurs 225 kV/HT et 225 kV/MT), les massifs sont constitués de longrines en béton armé couronnées de rails de type SNCF assurant la double fonction de voie de roulement et de repos ;

— pour les transformateurs non munis de galets de roulement mais d'un châssis permettant leur ripage sur les massifs (transformateurs 400 kV/HT, 90 kV/MT et 63 kV/MT), les massifs sont alors constitués de longrines lisses en béton armé.

Des dalles bétonnées, réalisées en béton armé et liaisonnées aux longrines, supportent les armoires et les coffrets de commande.

### 2.4.2 Insonorisation

L'implantation d'unités de transformation à proximité de maisons d'habitation peut conduire à prendre des précautions pour réduire le niveau de bruit en façade de ces habitations. Différentes solutions peuvent être utilisées :

- des modifications d'implantation :
  - éloignement des transformateurs,
  - changement d'orientation des aéroréfrigérants,
  - implantation des bâtiments du poste de façon à faire obstacle,
  - orientation par rapport aux régimes de vents dominants ;
- l'installation de transformateurs particuliers à bruit réduit fabriqués spécialement par les constructeurs ;
- l'utilisation de dispositifs insonorisants, qui sont au nombre de 4 et dont le tableau 2 indique l'efficacité acoustique :
  - l'**écran**, ou mur pare-son, qui est un panneau continu en matériau absorbant sonore qui entoure le transformateur sur un, deux ou trois côtés ;
  - la **cheminée** qui est la juxtaposition de quatre écrans entourant complètement le transformateur,
  - si des affaiblissements acoustiques importants sont nécessaires, la construction d'une **enceinte en maçonnerie** complètement fermée, seule solution satisfaisante ; cette disposition nécessite une ventilation mécanique forcée du local avec mise en place de **silencieux** à l'aspiration et au refoulement.

Tableau 2 – Efficacité acoustique de dispositifs insonorisants

Dispositif insonorisant	Affaiblissement [dB (A)]
Écran .....	$A \leq 15$
Cheminée.....	$10 \leq A \leq 15$
Enceinte en maçonnerie.....	$A \geq 20$

db (A) : décibel « filtre A »

### 2.4.3 Protection contre l'incendie

L'installation de transformateurs dans les postes entraîne l'adoption d'un certain nombre de précautions destinées à limiter l'extension d'un incendie ayant pris sa source dans l'appareil.

Les dispositions mises en œuvre sont fonction de la situation géographique du poste et de la position du transformateur par rapport aux habitations voisines.

#### 2.4.3.1 Zone d'habitation à plus de 20 m du transformateur

##### 2.4.3.1.1 Murs de protection contre l'incendie

Ils ont pour buts essentiels d'éviter la propagation aux appareils voisins d'un incendie éventuel se déclarant dans un transformateur, ainsi que de permettre l'approche du foyer aux équipes chargées de lutter contre l'incendie.

Placés de part et d'autre de chaque transformateur, ces murs ont des dimensions telles (hauteur et largeur) qu'ils débordent largement les transformateurs. Ils sont constitués par des ossatures préfabriquées en béton armé comportant des glissières verticales dans lesquelles sont introduites des dalles préfabriquées en béton armé ou non. En aucun cas, il ne doit être fait appel à des ossatures métalliques qui présentent un risque de grande déformation sous l'effet d'une chaleur intense, entraînant la destruction du mur pare-feu.

Associés aux dispositifs insonorisants évoqués précédemment, ces murs contribuent également à contrarier la propagation du bruit résultant du fonctionnement des transformateurs et de leurs accessoires.

##### 2.4.3.1.2 Fosse de réception d'huile

Pour respecter la réglementation en vigueur sur le rejet des hydrocarbures en milieu naturel (décret n° 77-254 et norme NF C13-000), il est nécessaire de disposer d'une fosse étanche de récupération.

Le dispositif global de récupération d'huile des transformateurs se compose de plusieurs éléments (figure 2) :

- au niveau du banc de transformation, un bac de récupération avec un caniveau collecteur et un regard décanteur ;
- des canalisations d'évacuation en acier avec revêtement intérieur en ciment ;
- un siphon coupe-feu intercalé sur le tracé des canalisations si la longueur des tuyaux d'évacuation est inférieure à 20 m ;
- une fosse de réception d'huile déportée couverte, comprenant une partie séparateur d'huile-eau et un compartiment récupérateur d'huile. Cet ensemble assure, par gravité, la séparation de l'huile et de l'eau et permet de recueillir l'huile, évitant ainsi tout risque de rejet de celle-ci vers l'extérieur.

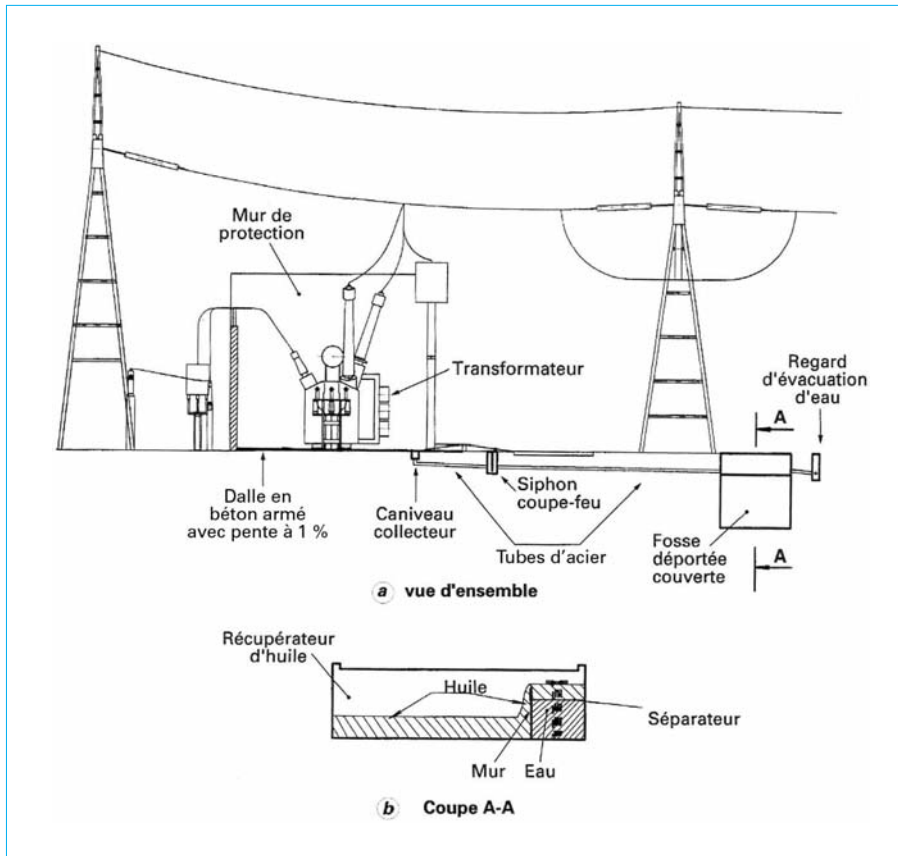


Figure 2 – Dispositif de réception d'huile pour transformateurs de puissance

#### 2.4.3.2 Zone d'habitation à moins de 20 m du transformateur

Il s'agit alors de postes en site urbain installés dans des bâtiments.

Un système plus complet est mis en œuvre, comprenant notamment :

- un ensemble de détection du feu ;
- un dispositif d'extinction automatique par eau pulvérisée, poussée par du CO<sub>2</sub> en bouteille sous pression dans des rampes d'aspersion alimentées par deux circuits séparés ;
- une fosse de réception d'huile identique à celle des transformateurs de tension supérieure à 90 kV, complétée par une cuve de barbotage remplie au tiers d'eau pour récupérer l'huile et les liquides d'extinction (l'huile arrivant sous l'eau) ;
- un système permettant d'isoler la cellule où le transformateur est en feu (arrêt de la ventilation et obturation des gaines et grilles par clapets coupe-feu) ;
- une structure en béton armé résistant à une pression de 20 kN/m<sup>2</sup>.

## 2.5 Bâtiments

**Nota** : concernant les matériels et installations cités dans ce paragraphe, le lecteur est invité à se reporter à *Postes à haute et très haute tensions. Installations de conduite et de contrôle* [D 4 576].

Différents types de bâtiments peuvent être rencontrés à l'intérieur d'un poste.

■ **Bâtiments de relaying (BR)** : ils sont utilisés dans le cas d'une installation en bâtiments de relaying extérieurs. Situés à proximité de l'appareillage à haute tension, ils abritent l'ensemble du matériel et des circuits à basse tension servant au contrôle et à la conduite d'une partie du poste. Ils comportent parfois un local des services auxiliaires où se trouvent les batteries des services auxiliaires.

■ **Bâtiments de commande (BC)** : deux grands types peuvent se rencontrer selon que l'on se trouve dans un poste avec pupitre à commande groupée (PCG) ou dans un poste asservi (PA).

Ces bâtiments abritent :

- un sous-ensemble de **conduite du réseau** :
  - local de commande avec synoptique,
  - local de téléconduite ;
- un sous-ensemble de **locaux techniques et sociaux** destiné aux opérations d'exploitation et de maintenance :
  - local d'exploitation,
  - atelier,
  - magasin,
  - sanitaires, etc.;
- éventuellement, pour les PA, un sous-ensemble relaying centralisé.

■ **Bâtiments d'unités auxiliaires (BUA)** : dans ces bâtiments sont installés les services auxiliaires alternatifs et les services auxiliaires continus des matériels de contrôle-commande, ces matériels étant éventuellement situés dans le bâtiment de commande.

On y trouve ainsi :

- un local de groupe électrogène ;
- un local de distribution 220 - 380 V (alternatif) ;



- éventuellement un local de batteries 125 V (continu) ;
- un local de distribution 125 V (continu).

Pour réduire les longueurs des câbles qui arrivent ou partent de ces bâtiments, ces derniers sont généralement situés au centre du poste.

■ **Bâtiments de sécurité (BS)** : ils permettent d'entreposer les matériels de sécurité servant aux travaux d'exploitation et de maintenance du poste.

Pour des postes de moindre importance, on peut regrouper dans un bâtiment unique les différentes installations généralement réparties dans plusieurs bâtiments.

Dans un but de standardisation et de rapidité d'exécution, l'ensemble de ces bâtiments est généralement réalisé en technique industrialisée préfabriquée (dalle en béton, charpente métallique en acier ou en aluminium, bardage isolant en panneaux sandwichs, toiture en bac acier ou panneaux sandwichs, etc.). Cependant, pour satisfaire des contraintes locales de voisinage et faciliter leur intégration dans l'environnement, les bâtiments peuvent être exécutés en construction traditionnelle.

## 2.6 Clôtures

Les différents types de clôtures mises en place autour des postes se caractérisent à la fois par le matériau utilisé et la géométrie adoptée.

On distingue cinq grandes familles suivant le type de poste.

■ **Type A** : la clôture de type A possède une partie droite d'une hauteur de 2,60 m par rapport au sol constituée par des poteaux et des palplanches en béton armé. Chaque poteau est surmonté d'une partie de 0,80 m inclinée à 45° vers l'extérieur, dénommée bavolet. Entre les bavolets sont tendus trois rangs de ronces de fil de fer barbelé.

■ **Type E** : la clôture de type E a des caractéristiques géométriques identiques à celles de la clôture de type A, mais les palplanches sont remplacées par des panneaux pleins esthétiques répondant à des contraintes d'environnement local.

■ **Type B** : cette clôture comprend une partie droite de 2,60 m de hauteur composée de poteaux en alliage d'aluminium supportant un grillage en fil d'almélec dont les mailles sont des losanges de surface inférieure à 3 000 mm<sup>2</sup>. Le tout est surmonté de bavolets de 0,80 m inclinés à 45° vers l'extérieur comportant trois rangs de ronces de fil de fer barbelé. Le soubassement est réalisé au moyen de palplanches en béton armé.

■ **Type D** : une variante du type B constitue le type D dont la hauteur est limitée à 2,00 m, sans bavolets et utilisé pour des clôtures intérieures si l'on veut isoler certaines zones.

■ **Type C** : ce type de clôture est constitué d'un grillage en acier galvanisé de 2,20 m de hauteur, fixé sur des poteaux en acier galvanisé et surmonté d'un bavolet de 0,80 m incliné à 45° vers l'extérieur avec ses trois rangs de ronces de fil de fer barbelé. Le soubassement est assuré par des palplanches en béton armé.

Plus discrètes et plus esthétiques que celles en béton armé (types A et E), les clôtures métalliques (types B, C et D), surtout avec le grillage plastifié, se comportent mieux dans le temps. En revanche, étant conductrices électriquement, des courants peuvent les parcourir (en particulier les courants d'induction provoqués par les lignes aériennes qui les surplombent). On doit donc mettre impérativement à la terre ces clôtures métalliques par l'intermédiaire d'un réseau si possible non relié au réseau de terre principal du poste (§ 3.6.1).

## 2.7 Caniveaux de câbles à basse tension

L'ensemble des câbles à basse tension (BT) d'un poste, assurant les liaisons de commande, d'alimentation ou de contrôle entre les différents matériels, emprunte dans la plupart des cas des passages privilégiés dénommés caniveaux de câbles BT. Ceux-ci, habituellement préfabriqués en béton armé, sont constitués d'un corps principal monobloc en U et d'une dalle de recouvrement.

Les câbles BT sont disposés en nappes successives dans le caniveau. On admet alors de ne pas retirer ces câbles mais d'en poser de nouveaux en cas de modification de la technique liée au contrôle-commande entre deux points du poste.

Le tracé des caniveaux doit être étudié avec soin, de façon à :

- être simple ;
- comporter le moins possible de changements brusques de direction. On notera que le rayon de courbure de chaque câble est supérieur à dix fois son diamètre ;
- éviter le plus possible les passages sous les pistes ou à proximité d'une route prévue pour charge lourde. Lorsque l'un de ces cas se présente, on utilise soit des caniveaux renforcés déterminés en fonction des charges supportées, coulés sur place et avec un couvercle en profilé métallique, soit des ouvrages spéciaux (buses ou fourreaux avec chambres de tirage, etc.) ;
- éviter la proximité des transformateurs de puissance (risque de propagation d'un incendie par l'huile enflammée) ; en cas d'impossibilité, les caniveaux sont remplis de sable et leurs extrémités bouchées au plâtre, après pose des câbles BT.

## 3. Réseau général de terre

### 3.1 Rôle d'une mise à la terre

La mise à la terre d'une installation électrique consiste à relier les masses ou le neutre de l'installation à une prise de terre par l'intermédiaire d'un ou de plusieurs conducteurs de terre. Dans les postes du Réseau de Transport d'Électricité (RTE), cette mise à la terre des masses et du neutre est commune. La prise de terre, appelée réseau de terre pour des installations importantes telles que les postes, est constituée d'un ensemble de conducteurs enterrés en contact direct avec le sol et reliés électriquement entre eux. Son rôle est de permettre l'écoulement, à l'intérieur du sol, de courants de défaut de toutes origines. Lors de tels écoulements par le réseau de terre, des différences de potentiel peuvent apparaître entre certains points, par exemple entre deux masses métalliques, entre une masse métallique et le sol, ou entre deux points du sol.

La conception du réseau de terre doit permettre, même dans ces conditions, d'assurer le maintien :

- de la sécurité des personnes ;
- de la protection des installations de puissance ;
- de la protection des équipements sensibles ;
- d'un potentiel de référence.

En conséquence, le réseau de terre doit :

- assurer un environnement sûr à l'intérieur du poste et de ses abords immédiats en limitant les tensions de pas et de toucher, définies ci-après, à des valeurs non dangereuses pour le corps humain ou les animaux ;
- limiter la création et les effets des surtensions provoquées par des défauts, des manœuvres d'appareillages ou la foudre ;

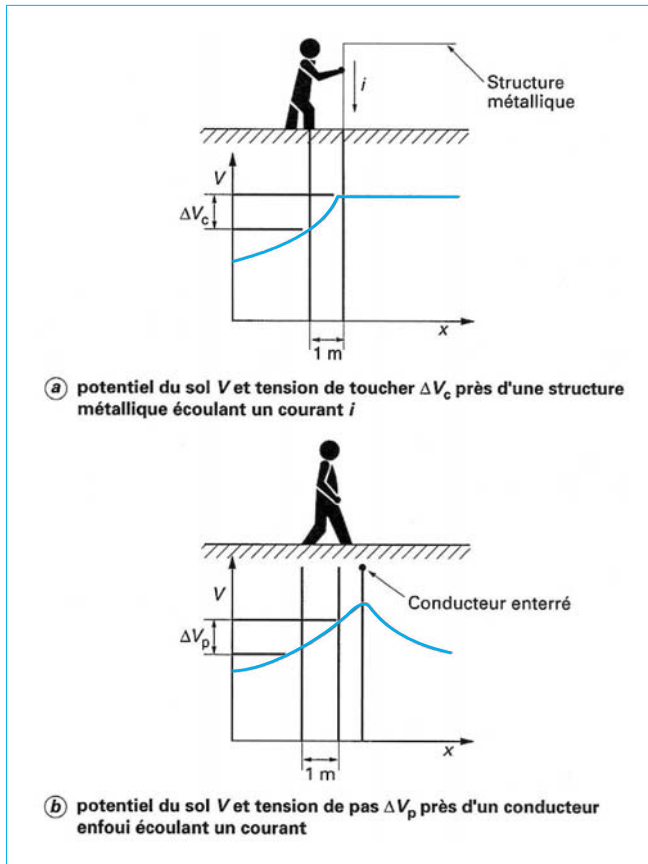


Figure 3 – Tensions de toucher et de pas

– maintenir les différents équipements du poste électriquement reliés entre eux à un potentiel identique.

**Tension de toucher (ou de contact) :** la tension de toucher (figure 3a) est la différence de potentiel entre une structure métallique mise à la terre et un point situé à la surface du sol, à une distance égale à 1 m.

**Tension de pas :** la tension de pas (figure 3b) est la différence de potentiel entre deux points, à la surface du sol, séparés par une distance d'un pas.

Dans la direction du gradient de potentiel maximal, cette distance est prise égale à 1 m.

### 3.2 Principe de conception d'un réseau de terre de poste

Pour satisfaire les conditions énoncées au paragraphe précédent (§ 3.1), le réseau de terre doit respecter deux principes fondamentaux :

- être équipotentiel, c'est-à-dire minimiser les différences de potentiel auxquelles les équipements du poste et les personnes sont susceptibles d'être soumis ;
- avoir une résistance de terre faible afin de favoriser l'écoulement dans le sol du courant engendré par les défauts.

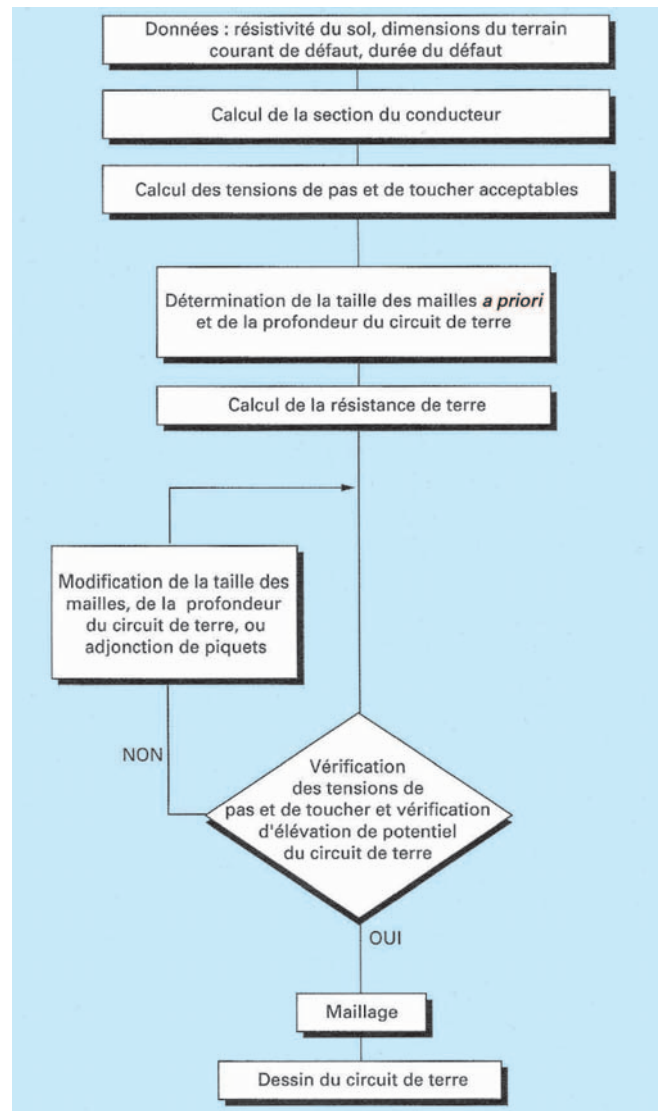


Figure 4 – Organigramme pour la conception d'un circuit de terre

Les paramètres à prendre en compte au départ sont la résistivité du sol, les dimensions du terrain pour réaliser le réseau de terre, l'intensité du courant de défaut et la durée du défaut.

Le coût de réalisation sera également intégré au cours de l'étude pour comparer différentes solutions possibles.

La démarche à suivre peut se présenter sous la forme de l'organigramme de la figure 4.

### 3.3 Réalisation pratique

À partir des notions exprimées précédemment (§ 3.1 et § 3.2), des règles de réalisation ont pu être établies.



**Tableau 3 – Section des conducteurs de terre**

$I_{cc}/t$ (1)..... (kA/s)	20/0,7	20/2	31,5/0,8	40/0,25	63/0,25
$I_{d\acute{e}f}$ (2) ..... (kA)	10,3 (3)	10,3 (3)	31,5	40	63
Section minimale calculée..... (mm <sup>2</sup> )	32	54,1	104,7	74,3	117
Section installée (4)..... (mm <sup>2</sup> )	74,9	74,9	116	146	182

(1)  $I_{cc}$  : courant triphasé de court-circuit,  $t$  durée d'élimination du défaut.  
 (2)  $I_{d\acute{e}f}$  : courant monophasé s'écoulant dans le réseau de terre.  
 (3) Cette valeur correspond au réseau à 90 kV (pour mémoire, on a 8 kA pour le réseau à 63 kV).  
 (4) Pour des raisons de tenue mécanique, EDF choisit des valeurs parfois éloignées des valeurs minimales.

### 3.3.1 Équipotentialité

Pour assurer un réseau de terre équipotentiel et ainsi limiter les tensions de pas et de toucher, il faut :

- réaliser un maillage de conducteurs dans la terre (réseau principal) relativement dense, en lignes parallèles espacées d'une distance constante, cela sans interruption des conducteurs (tension de pas) ;
- relier à ce maillage toutes les structures métalliques à l'air libre et les masses métalliques des appareils (tension de toucher) par au moins deux dérivations éloignées ; les liaisons seront réalisées par des connexions larges les plus courtes possibles.

### 3.3.2 Écoulement du courant de défaut

Pour permettre l'écoulement à la terre des courants de défaut de toutes origines, le concepteur doit s'assurer de la pérennité du circuit de terre, vérifier le bon dimensionnement des conducteurs vis-à-vis des échauffements et prendre en compte les variations de la résistivité du sol environnant.

■ **Nature des conducteurs** : les conducteurs doivent être protégés contre les dégradations mécaniques et chimiques. Pour ces raisons, seuls sont admis les câbles nus en cuivre écroui ou recuit.

Les liaisons entre les conducteurs du réseau principal de terre, ou entre celui-ci et les pièces métalliques, sont faites avec des raccords, du type à serrage par boulons si elles sont visitables, et avec des connexions par brasage ou sertissage si elles sont souterraines ou inaccessibles.

■ **Dimensionnement des conducteurs** : la section minimale des conducteurs de terre en cuivre est fixée par l'arrêté interministériel du 17 mai 2001 à 25 mm<sup>2</sup>. En fait, cette section dépend du courant de court-circuit à évacuer du poste et de la durée d'élimination du défaut.

Il s'avère donc que, dans tous les cas, la section du réseau de terre des postes est supérieure à ce minimum fixé par l'arrêté interministériel.

Le tableau 3 précise les sections minimales de câbles de cuivre à utiliser pour les réseaux de terre des postes.

Le dimensionnement des conducteurs est obtenu à partir des hypothèses suivantes :

- l'échauffement du conducteur est limité à 750 °C ;
- une seule connexion doit pouvoir assurer l'écoulement du courant de défaut, bien que chaque pièce soit raccordée à la terre en plusieurs points.

■ **Nature du terrain** : la nature du terrain conditionne la réalisation du réseau de terre tant par sa structure physique que par sa résistivité. Il est nécessaire de tenir compte de l'hétérogénéité du sol en surface et en profondeur. Il convient aussi de prendre en compte les variations saisonnières de la résistivité du sol, car le but recherché est d'obtenir un réseau de terre efficace même dans les périodes les plus défavorables. En conséquence, la conception du réseau de

terre commence nécessairement par une étude géologique et des mesures de résistivité du sol où sera implantée l'installation. La profondeur d'enfouissement du réseau de terre est limitée dans certains cas par la présence à faible profondeur de couches dures, ou simplement de résistivité beaucoup plus grande que celle des couches de surface. Dans d'autres cas, la résistivité des couches de surface étant plus élevée que celle des couches immédiatement inférieures soit d'une manière permanente, soit en période de sécheresse ou de gel, une profondeur plus importante est recherchée. On s'efforce en conclusion de réaliser un réseau de terre de surface dont les conducteurs sont placés en tranchée à une profondeur d'environ 80 cm.

En complément du réseau de terre de surface, on peut utiliser des piquets de terre. Ces piquets sont enfoncés dans le sol afin d'atteindre des couches de terrain plus conducteur en profondeur.

■ **Protection des câbles BT** : en outre, le réseau de terre, lorsqu'il écoule des surtensions à front raide ou des surintensités, peut engendrer des perturbations sur les câbles BT enterrés et situés dans son voisinage. Il est nécessaire de protéger les câbles BT par un écran métallique relié à la terre à ses deux extrémités.

Pour éviter également toute dégradation lors de l'échauffement du câble de terre, tous les câbles BT devront être situés à plus de 30 cm des câbles du circuit de terre. Cela conduit généralement à les enterrer à une profondeur de 50 cm.

## 3.4 Protection contre la foudre

Des dispositions sont prises pour rendre très improbables des défauts provoqués dans le poste par la foudre :

- en limitant les surtensions provenant de coups de foudre sur les lignes (par l'installation d'éclateurs ou de parafoudres) ;
- en protégeant le poste contre les coups de foudre directs par un filet de garde constitué par des conducteurs aériens couvrant les installations.

Ces dispositifs sont reliés au réseau principal de terre du poste.

Les connexions ainsi que le réseau de terre principal doivent, en plus des règles liées aux courants de défaut à 50 Hz développées précédemment (§ 3.3), être faiblement inductifs, afin de limiter les montées en potentiel dues à l'écoulement de très grandes intensités de courant pendant un temps très court.

## 3.5 Raccordement des différents équipements au réseau de terre

■ **Masses métalliques** : les charpentes principales, les châssis supports d'appareillage et, d'une façon générale, toutes les masses métalliques sont reliés à au moins une boucle ininterrompue du réseau de terre souterrain. Ce raccordement est réalisé par l'inter-

médiaire d'un sabot de terre à ailettes, placé juste au-dessus du sol, à partir duquel peuvent être tirées des antennes aériennes. Dans le cas où un sabot ne suffit pas, on peut installer un plat de cuivre de section identique à celle du circuit principal de terre, sur lequel peuvent être fixés plusieurs sabots de terre.

Les couteaux de mise à la terre des sectionneurs de ligne, les neutres et les bornes des transformateurs de mesure sont reliés directement à la boucle du circuit principal.

■ **Transformateurs de puissance** : la mise à la terre des transformateurs doit être particulièrement soignée.

Le maillage du réseau de terre doit être renforcé aux abords des cellules du transformateur. La cuve du transformateur doit être mise à la terre en passant par un point unique, le transformateur de courant **masse cuve**, qui signale tout défaut. Il ne doit pas y avoir d'autres liaisons avec la terre, ce qui impose des plaques et des boulons isolants au niveau des galets de roulement. La connexion de mise à la terre doit être large et la plus courte possible, la longueur maximale étant de 4 m.

■ **Bâtiments** : un poste comprend un ou plusieurs bâtiments industriels. Chacun d'entre eux doit être raccordé au réseau de terre principal en deux points au moins.

À l'intérieur du bâtiment, des collecteurs de terre horizontaux de même section que le réseau extérieur cheminent entre ces deux points. Les appareils et pièces métalliques sont raccordés aux collecteurs. Dans les locaux comportant du matériel électronique, un collecteur chemine à proximité de chaque file d'armoires afin d'assurer l'équipotentialité.

■ **Structures en béton** : les armatures de toute structure en béton armé (routes, pistes, massifs, etc.) ne sont pas utilisées pour assurer la continuité des conducteurs de terre, par suite des risques d'éclatement du béton en cas d'élévation rapide de la température des armatures.

## 3.6 Dispositions particulières

### 3.6.1 Mise à la terre des clôtures

L'implantation de clôtures métalliques autour des postes à haute tension pose des problèmes d'environnement électrique. En effet, celles-ci peuvent être le siège de phénomènes d'induction ou de conduction, risquant de provoquer des tensions de toucher ou de pas vis-à-vis d'individus situés à l'extérieur de l'ouvrage.

Pour un poste neuf, si la clôture est conductrice (métallique), il est nécessaire de mettre celle-ci à la terre par un câble en cuivre de 75 mm<sup>2</sup> de section, enterré dans le plan du grillage et relié à ce dernier tous les 20 m environ. Ce câble de terre doit être distinct du réseau de terre principal du poste.

En cas d'impossibilité, lorsque la clôture est raccordée de fait sur le réseau de terre principal du poste par la présence en sous-sol de structures métalliques, une vérification des tensions de pas et de toucher aux abords de la clôture doit être faite.

### 3.6.2 Postes en bâtiment de site urbain

Le circuit de terre du poste est composé de deux réseaux connectés entre eux, l'un souterrain enterré sous le bâtiment, l'autre dit *aérien* qui circule à travers les différents locaux du bâtiment.

Le réseau de terre souterrain est constitué de manière identique à celui d'un poste ouvert.

Le réseau aérien, ayant les mêmes objectifs que tout circuit de terre, est maillé et réalisé par des boucles horizontales à chaque niveau, reliées entre elles par plusieurs remontées verticales, elles-

mêmes raccordées au réseau souterrain. Les appareils et les pièces métalliques sont connectés aux boucles horizontales par des liaisons dont la section dépend du courant à transiter.

Les remontées verticales et les collecteurs de terre horizontaux ont la même section que le réseau souterrain.

### 3.6.3 Mise à la terre pour travaux

Il est obligatoire, avant toute intervention sur des installations électriques hors tension, de relier celles-ci au réseau de terre principal local en deux points encadrant la zone de travail, de façon à protéger le personnel d'exécution contre toute mise sous tension intempestive. La plupart des points de raccordement du réseau de terre principal aux charpentes sont pourvus de plusieurs ailettes permettant de raccorder, quand cela est nécessaire, ces mises à la terre pour travaux. Celles-ci se composent de câbles souples en cuivre munis de dispositifs de raccordement appropriés.

## 4. Charpentes des postes

### 4.1 Types de charpentes

Dans les postes extérieurs, on appelle **charpentes principales** les assemblages métalliques qui servent à l'ancrage ou au soutien des connexions tendues, tant du côté ligne que du côté poste, et **charpentes secondaires** celles qui servent de support aux appareils à haute tension et aux colonnes isolantes. Elles sont déterminées en tenant compte des conditions techniques imposées par les efforts exercés, des conditions d'aspect qui respectent la clarté des installations et, enfin, des conditions économiques.

### 4.2 Conception

Il est fait largement emploi de charpentes à deux membrures inclinées par poteau, avec des entretoises horizontales. Ce type de charpente, dit en A, convient particulièrement à des efforts longitudinaux importants, sa légèreté et son aspect dépouillé respectant particulièrement bien la clarté des installations. Il est surtout employé pour les charpentes principales.

Lorsqu'une forte inertie transversale est nécessaire, il peut être utilisé des charpentes composées de quatre cornières verticales, entretoisées horizontalement par des plats assemblés en échelle. Les charpentes secondaires sont réalisées de cette façon.

### 4.3 Choix du matériau et protection contre la corrosion

Les charpentes principales et secondaires sont en acier. Lorsqu'elles sont installées dans des atmosphères rurales, urbaines (industrielles faiblement agressives) ou marines, elles sont systématiquement protégées par galvanisation à chaud après préparation des surfaces (épaisseur minimale du revêtement de zinc 70 µm).

Pour les ouvrages construits à des emplacements où l'atmosphère est très agressive, la galvanisation peut être insuffisante pour assurer une protection durable des charpentes. C'est notamment le cas :

- des atmosphères marines très exposées, aux abords immédiats du rivage, avec projection d'embruns ;
- des atmosphères industrielles à forte concentration sulfureuse.

La solution peut alors consister à adopter une des protections suivantes :

- des peintures avec produits vinyliques ou élastomères de synthèse, qui, appliquées en couches nombreuses, résistent bien ;
- un système mixte galvanisation-peinture, pour lequel il y a lieu de veiller au dégraissage de la galvanisation et à la compatibilité entre couches de métal d'apport et peinture.

Exceptionnellement, pour résoudre le cas de certaines atmosphères agressives, on peut avoir recours à des charpentes en alliage d'aluminium (en particulier comme charpentes secondaires), car elles ne nécessitent aucune intervention d'entretien pendant la durée de vie de l'ouvrage.

## 4.4 Calcul des charpentes

### 4.4.1 Efforts et hypothèses climatiques

Les charges qui s'appliquent sur les charpentes sont de trois types :

- les charges statiques décomposées en :
  - charges permanentes (poids de la structure, poids des appareils supportés par la charpente, poids des conducteurs suspendus, etc.),
  - surcharges climatiques (vent, froid, givre) s'appliquant sur la charpente, les appareils et les conducteurs ;
- les surcharges électrodynamiques provoquées par des courants de court-circuit ;
- les charges de construction et d'entretien.

Nous rappelons ci-après les hypothèses climatiques prises en compte :

- AZVN : hypothèse de vent normal ;
- AZVF : hypothèse de vent fort ;
- HPV : hypothèse haute pression de vent ;
- B : hypothèse de froid ;
- GL : hypothèse de givre à surcharge légère ;
- GM : hypothèse de givre à surcharge moyenne.

Pour les hypothèses de charge, on distingue trois états d'équipement :

- l'état final, où, suivant la disposition adoptée pour l'ouvrage, les charpentes principales peuvent être chargées soit de part et d'autre, soit d'un seul côté ;
- l'état intermédiaire, qui correspond à différentes évolutions d'équipement de l'ouvrage ;
- l'état provisoire ou d'attente, dû au fait que les charpentes peuvent être placées dans des situations provisoires de courte durée, au moment de la construction ou de la modification des ouvrages ; cet état apparaît principalement pour les charpentes qui servent de structures d'arrêt lors de la construction, alors qu'elles sont chargées de part et d'autre dans les états intermédiaires et finals ; c'est le cas, en particulier, de l'arrêt des câbles des lignes aériennes sur les portiques d'ancrage.

### 4.4.2 Dimensionnement et vérification

Pour une charpente donnée, on commence par faire le bilan des charges qui lui sont appliquées. Ces charges ne sont pas pondérées par des coefficients de sécurité.

Puis, à partir de combinaisons de charges bien définies, on détermine les sollicitations (effort normal, effort tranchant, moment de

flexion, moment de torsion), les contraintes et les déformations dans chaque élément de la structure.

Les conditions mécaniques à respecter sont dictées par la théorie des états limites.

■ **État limite ultime (ELU)** : la contrainte dans chaque élément doit être inférieure à une contrainte admissible fonction de l'hypothèse et du cas de charge considérés, et déterminée à partir de la limite d'élasticité du matériau par application de coefficients de sécurité donnés par des règlements officiels (par exemple, CM66 ou DTU P22-701) ou par des règles internes à RTE.

■ **État limite de service (ELS)** : les flèches dans certains éléments essentiels à la bonne exploitation du poste doivent être inférieures à des valeurs maximales, elles aussi fonction des hypothèses de départ.

Le tableau 4 explicite les hypothèses à prendre en compte et les conditions mécaniques à respecter.

Le choix des profils à employer et des sections à respecter est effectué à l'aide d'un code de calcul tridimensionnel, d'une modélisation et d'un règlement adaptés au calcul de la structure.

## 5. Matériels à haute tension

**Nota** : ces matériels répondent aux normes NF EN 60694 et NF C64-020.

### 5.1 Sectionneurs

**Nota** : les sectionneurs répondent aux normes NF C64-131, NF C64-132, NF C64-140, NF C64-162, NF C64-163. Le lecteur est également invité à se reporter au dossier *Interruption des circuits alimentés en courant continu* [D 4 700].

Dans les dispositions de postes à haute tension (voir [D 4 572]), on trouve, suivant les cas :

- des sectionneurs à deux colonnes, parmi les plus simples et les plus abondants sur le réseau ; appareils à commande rotative (90°), ils présentent l'inconvénient d'avoir un encombrement important, les bras engageant la distance entre phases en position d'ouverture ;
- des sectionneurs pantographes ou semi-pantographes, de faible encombrement, permettant de raccorder directement des conducteurs situés à des niveaux différents ;
- des sectionneurs à rupture brusque (de moins en moins utilisés), sectionneurs auxquels on a adjoint un dispositif permettant la coupure de courants de faible intensité ; une des formes les plus répandues de ces appareils est élaborée à partir d'un sectionneur à ouverture verticale : au contact mobile est associé un jonc de coupure qui permet d'obtenir une vitesse de séparation des contacts très élevée en ne se libérant que lorsque le bras mobile est suffisamment éloigné ;
- des sectionneurs de mise à la terre, parmi lesquels on distingue :

- les couteaux de mise à la terre, qui, associés aux sectionneurs à deux colonnes, sont destinés à la mise à la terre des lignes lors des consignations d'ouvrages et pour lesquels on n'exige aucune performance électrique,
- les sectionneurs de mise à la terre, qui diffèrent des précédents par leur aptitude à supporter les courants de court-circuit très élevés susceptibles d'apparaître dans l'ouvrage.

**Tableau 4 – Récapitulatif des conditions mécaniques à respecter**

Cas de vérification		Conditions à respecter														
Hypothèses de charge		Hypothèses météorologiques	Câbles haubans manchons d'ancrage	Armement	Colonnes isolantes appareillage HT raccords	Tubes des jeux de barres		Charpentes					Scellement des crosses d'ancrage	Massifs de fondations		
États d'équipement et de chargement	Nature des charges							Portiques et poteaux d'ancrage			Supports d'appareils ou de colonnes isolantes				Effort maximal admissible	Coefficient de stabilité minimal
								Contrainte maximale admissible	Flèche maximale admissible des poutres	Flèche maximale admissible des poteaux	Contrainte maximale admissible	Flèche maximale admissible				
État final et intermédiaire	Charges statiques	AZVN AZVF HPV	$\frac{0,95 \times CRA}{3}$	$\frac{CRN}{3}$	$\frac{CRM}{2,1}$	$\frac{R_e}{1,8}$	$\frac{L}{150}$	$\frac{R_e}{1,8}$	$\frac{L}{200}$	$\parallel : \frac{h}{200}$ $\perp : \frac{h}{150}$	$\frac{R_e}{1,8}$	$\frac{h}{300}$	$\frac{CRM}{2,1}$	2		
		GL ou GM	$\frac{0,95 \times CRA}{1,4}$	0,6 CRN	CRM	$R_e$		$R_e$				$R_e$		CRM	1	
	Surcharges électro-dynamiques	Vent (1) + CC	$\frac{0,95 \times CRA}{1,4}$	$\frac{CRM}{2}$	CRM × 0,7	$R_e$		$R_e$						CRM × 0,7	1	
État d'attente	Charges statiques	AZVN AZVF HPV						$R_e$					$R_e$	CRM	2	
		B						$R_e$					$R_e$	CRM	2	
État final État intermédiaire État d'attente	Charge de construction et d'entretien	+ 5 °C sans vent						$\frac{R_e}{1,2}$					$\frac{R_e}{1,2}$	$\frac{CRM}{1,2}$	1	

CRA : charge de rupture assignée  
 CRM : charge de rupture minimale spécifiée (pour les crosses d'ancrage, on considère la CRM de la liaison béton-acier)  
 CRN : charge de rupture nominale  
 (1) voir tableau 5.

$R_e$  : limite élastique minimale  
 L : longueur des tubes ou des poutres  
 h : hauteur des éléments des poteaux ou des supports  
 $\parallel$  : déplacement dans le sens des conducteurs  
 $\perp$  : déplacement dans le sens perpendiculaire aux conducteurs

**Tableau 5 – Vent concomitant d'accompagnement : hypothèse CC**

Désignation	Température	Vent sur les structures			
		Surfaces planes (daN/m <sup>2</sup> )	Tubes $\varnothing \leq 15$ cm (daN/m <sup>2</sup> )	Tubes $\varnothing > 15$ cm (daN/m <sup>2</sup> )	Câble nu (daN/m <sup>2</sup> )
CC	Conducteur : + 45 °C Autres : + 15 °C	100	72 — 1,6 × $\varnothing$ (en cm)	48	53

Les trois pôles d'un même appareil peuvent être tringlés, lorsqu'il existe une liaison mécanique entre eux, ou séparés, lorsque la manœuvre de chaque pôle est opérée individuellement.

La commande de la manœuvre peut être :

- manuelle : elle s'opère alors localement soit par levier direct, soit par manivelle avec boîte de démultiplication de l'effort ;
- électrique : elle s'opère généralement à distance mais il existe toujours un dispositif de secours à manœuvre locale.

## 5.2 Disjoncteurs

**Nota** : les disjoncteurs répondent aux normes NF EN 62271-100, NF C64-101, NF C64-102, NF C64-105, NF C64-110, NF C64-115, UTE C64-116. Le lecteur est également invité à se reporter au dossier *Interruption des circuits alimentés en courant continu* [D 4 700].

Tous les disjoncteurs sont installés sur des châssis métalliques fixés sur des massifs en béton (figure 1) à l'aide de crosses préscellées, normalisées en position et en diamètre. Pour les échelons de

tension 225 et 400 kV, les massifs sont des longrines en béton armé et la hauteur de chaque pied du disjoncteur est réglable par l'intermédiaire d'un plat en acier galvanisé de 250 mm × 250 mm.

### 5.3 Transformateurs de mesure

**Nota** : les transformateurs de courant répondent à la norme NF EN 60044-1, les transformateurs de tension à la norme NF C42-501. Le lecteur est également invité à se reporter aux dossiers *Transformateurs de mesure* [D 4 720] [D 4 722] [D 4 724].

Ces appareils sont installés sur des charpentes en acier galvanisé fixées sur des massifs par l'intermédiaire de crosses de scellement. Leur montage et leur démontage s'opèrent au moyen de grues.

### 5.4 Condensateurs de couplage des équipements à haute fréquence et des circuits bouchons

**Nota** : les condensateurs de couplage répondent à la norme NF C54-110 et les circuits bouchons à la norme CEI 60353.

Les **condensateurs de couplage** sont employés pour les liaisons à haute fréquence utilisant comme supports des lignes de transport d'énergie lorsque l'installation ne comporte pas de transformateur condensateur de tension. Ils sont montés comme ces derniers sur des charpentes métalliques fixées sur des massifs.

Les **circuits bouchons**, également utilisés pour les liaisons à haute fréquence, sont conçus pour être posés verticalement ; ils sont le plus souvent montés sur la partie supérieure des condensateurs de couplage ou des transformateurs condensateurs de tension.

### 5.5 Transformateurs de puissance

**Nota** : les transformateurs de puissance répondent, d'une façon générale, à la norme CEI 60076. Le lecteur est également invité à se reporter au dossier *Transformateurs statiques. Principes et fonctionnement* [D 3 050].

Les caractéristiques essentielles d'installation de ces appareils sont indiquées au paragraphe 2.4.

Les appareils sont acheminés sur le site par remorques routières. Ceux qui sont équipés de galets de roulement sont déchargés sur la prolongation des rails appartenant aux longrines de repos, puis roulés jusqu'à leur emplacement définitif. Pour les appareils non munis de ces galets, la remorque routière est amenée au droit des longrines de repos et le transformateur est ripé latéralement sur les longrines par l'intermédiaire d'un platelage constitué de madriers.

### 5.6 Parafoudres

**Nota** : les parafoudres répondent à la norme NF EN 60099-1. Le lecteur est invité à se reporter au dossier *Parafoudres* [D 4 755].

Ils sont installés sur des charpentes en acier galvanisé soit fixées sur des massifs par l'intermédiaire de crosses, soit fixées directement sur l'appareil à protéger. Ils assurent la protection contre les surtensions des câbles haute tension, dans le cas de départ ou d'arrivée aérosouterraine, et des transformateurs de puissance. Dans tous les cas, ils sont placés au plus près de l'élément à protéger.

## 6. Isolateurs et supports isolants

Leur fonction est d'assurer l'isolement des conducteurs sous tension par rapport à des masses qui sont généralement chargées du rôle de support (charpentes métalliques par exemple). Leurs caractéristiques dépendent en particulier :

- de la tension nominale du réseau ;
- du courant de court-circuit du poste ;
- des caractéristiques mécaniques recherchées ;
- de la sévérité de pollution du site.

**Nota** : ils répondent aux normes CEI 60071, NF EN 60071, NF EN 60507 et CEI 60815.

### 6.1 Chaînes isolantes

**Nota** : leurs caractéristiques mécaniques sont décrites dans la norme NF EN 60305. Le lecteur est également invité à se reporter aux dossiers *Câbles de transport d'énergie* [D 4 520] [D 4 521].

Les isolateurs qui entrent dans la composition des chaînes isolantes sont en verre trempé et du type à capot et tige.

### 6.2 Supports isolants

**Nota** : ils sont conformes aux normes CEI 60273, NF EN 60168, NF C66-038, NF C66-039. Le lecteur est également invité à se reporter aux dossiers *Câbles de transport d'énergie* [D 4 520] [D 4 521].

Les normes définissent cinq types de supports isolants caractérisés par une ou plusieurs lettres. Les plus couramment employés sont :

- le type C, support isolant d'extérieur avec armatures métalliques externes, utilisé pour supporter les jeux de barres et les connexions entre appareils ;
- le type H, support isolant d'extérieur avec armatures métalliques internes, que l'on peut trouver dans certains équipements pour réaliser des isollements intermédiaires.

Pour ces deux types, la partie isolante peut être en céramique verte ou en verre trempé.

Le choix d'un support isolant est effectué à partir :

- des caractéristiques mécaniques du support ; les conditions à respecter en fonction des diverses hypothèses sont précisées dans le tableau 4 ;
- des caractéristiques électriques définies par la tension de tenue aux chocs de foudre qui dépend de la tension nominale du réseau sur lequel est installé le support isolant ; les règles de coordination d'isolement associées à cette tension nominale la tension de tenue aux chocs de manœuvre et la tension de tenue à la fréquence industrielle ; l'ensemble de ces grandeurs électriques, regroupées dans le tableau 6, détermine la hauteur du support isolant ;
- de la ligne de fuite dont la valeur minimale est donnée dans *Postes à haute et très haute tensions. Dispositions constructives* [D 4 572].



**Tableau 6 – Caractéristiques électriques et hauteur des supports isolants**

Tension nominale du réseau (kV)	Tension de tenue phase-masse			Hauteur du support isolant	
	aux chocs de foudre (kV)	aux chocs de manœuvre (kV)	à fréquence industrielle sous pluie (kV)	type H (mm)	type C (mm)
63	325		140	620 ± 1	770 ± 1
90	450		185		1 020 ± 1
225	1 050	850	460		2 300 ± 3,5
400	1 425	1 050	630		3 150 ± 4,5

## 7. Connexions aériennes

Elles sont réalisées soit en câbles, soit en tubes.

### 7.1 Connexions aériennes en câbles

#### 7.1.1 Caractéristiques

**Nota** : elles sont données dans la norme NF EN 50182. Le lecteur est également invité à se reporter aux dossiers *Câbles de transport d'énergie* [D 4 520] [D 4 521].

Les connexions en câbles que l'on rencontre dans un poste peuvent être regroupées en trois catégories :

- les connexions tendues entre charpentes, ainsi que les câbles de garde qui constituent le réseau aérien de protection contre la foudre ;
- les connexions semi-tendues entre les appareils HT, dont la longueur et la tension mécanique sont relativement faibles ;
- les descentes souples qui relient les connexions tendues aux appareils HT.

Ces connexions sont réalisées en conducteurs homogènes en alliage d'aluminium, à l'exception des câbles de garde qui comportent une âme d'acier.

Les tableaux **7** et **8** précisent les caractéristiques mécaniques et électriques des câbles utilisés le plus couramment.

**Tableau 7 – Caractéristiques mécaniques et électriques des câbles homogènes en alu-méc**

Désignation.....	288/AGS/37 Aster 288	570/AGS/61 Aster 570	851/AGS/91 Aster 851	1144/AGS/91 Aster 1 144
Résistance linéique à 20 °C..... (Ω/km)	0,115 0	0,058 3	0,039 1/0,041 7 (1)	0,029 2/0,032 5 (1)
Section des fils..... (mm <sup>2</sup> )	288,34	570,22	850,66	1 143,51
Composition :				
Nombre de fils.....	37	61	91	91
Diamètre..... (mm)	3,15	3,45	3,45	4
Masse linéique (câble non graissé)..... (kg/m)	0,794	1,574	2,354	3,164
Charge à la rupture assignée (CRA)..... (daN)	9 370	18 530	27 650	36 020
Module d'Young..... (MPa)	57 000	54 000	52 500	52 500
Coefficient de dilatation..... (en 10 <sup>-6</sup> /K)	23	23	23	23
Effort horizontal sur conducteur nu par vent de 72 daN/m <sup>2</sup> ..... (daN/m <sup>2</sup> )	1,60	2,25	2,75	3,20
Surcharge de givre d'épaisseur 2 cm :				
Masse linéique totale (2)..... (kg/m)	2,40	3,60	4,65	5,70
Effort horizontal par vent de 18 daN/m <sup>2</sup> ..... (daN/m <sup>2</sup> )	1,10	1,30	1,40	1,50
Surcharge de givre d'épaisseur 4 cm :				
Masse linéique totale (2)..... (kg/m)	5,50	7,0	8,33	9,63
Effort horizontal par vent de 17 daN/m <sup>2</sup> ..... (daN/m <sup>2</sup> )	1,84	2,0	2,12	2,23

(1) avec effet de peau

(2) câble + givre

**Tableau 8 – Caractéristiques mécaniques et électriques des câbles de garde en almélec/acier**

Désignation .....	94,1R/AGS + C/15 + 19Phlox 94,1	147,1R/AGS + C/30 + 7Pastel 147,1	
Résistance linéique à 20 °C .....	(Ω/km) 0,642	0,279	
Section des fils :			
almélec .....	(mm <sup>2</sup> ) 51,95	119,26	
acier .....	(mm <sup>2</sup> ) 42,12	27,83	
Composition :			
almélec {	nombre de fils .....	{ 15	{ 30
	diamètre .....	{ 2,10	{ 2,25
acier {	nombre de fils .....	{ 19	{ 7
	diamètre .....	{ 1,68	{ 2,25
Masse linéique (câble non graissé) .....	(kg/m) 0,481	0,547	
Charge à la rupture assignée (CRA) .....	(daN) 7 796	7 912	
Module d'Young .....	(MPa) 112 000	84 000	
Coefficient de dilatation .....	(en 10 <sup>-6</sup> /K) 14,7	18,1	
Effort horizontal sur conducteur nu par vent de 72 daN/m <sup>2</sup> .....	(daN/m <sup>2</sup> ) 0,91	1,13	
Surcharge de givre d'épaisseur 2 cm :			
Masse linéique totale (2) .....	(kg/m) 1,71	1,9	
Effort horizontal par vent de 18 daN/m <sup>2</sup> .....	(daN/m <sup>2</sup> ) 0,95	1,0	
Surcharge de givre d'épaisseur 4 cm :			
Masse linéique totale (2) .....	(kg/m) 4,45	4,75	
Effort horizontal par vent de 17 daN/m <sup>2</sup> .....	(daN/m <sup>2</sup> ) 1,67	1,72	
(1) avec effet de peau			
(2) câble + givre			

Le choix des câbles est effectué à partir de l'étude de trois paramètres :

- l'échauffement provoqué par le passage du courant ;
- la tension mécanique ;
- l'effet couronne.

### 7.1.2 Courants admissibles dans les connexions

Trois régimes de fonctionnement sont définis pour les appareillages à haute tension et leurs connexions de raccordement (voir [D 4 572]) :

- le régime permanent ;
- le régime de surcharge, d'une durée maximale de 20 min ;
- l'écoulement du courant de court-circuit.

Les courants peuvent être déterminés, pour le régime permanent, au moyen d'une formule déduite de l'expérience qui traduit un équilibre entre l'énergie thermique, apportée par les pertes par effet Joule et le rayonnement solaire, et l'énergie thermique dissipée par rayonnement et convection dans l'air. Cette formule est décrite dans le dossier *Lignes aériennes. Dimensionnement* [D 4 421].

En régime de surcharge, on utilise la forme différenciée de l'équation citée précédemment. On écrit que la différence entre les énergies absorbée et perdue est accumulée dans le conducteur, soit :

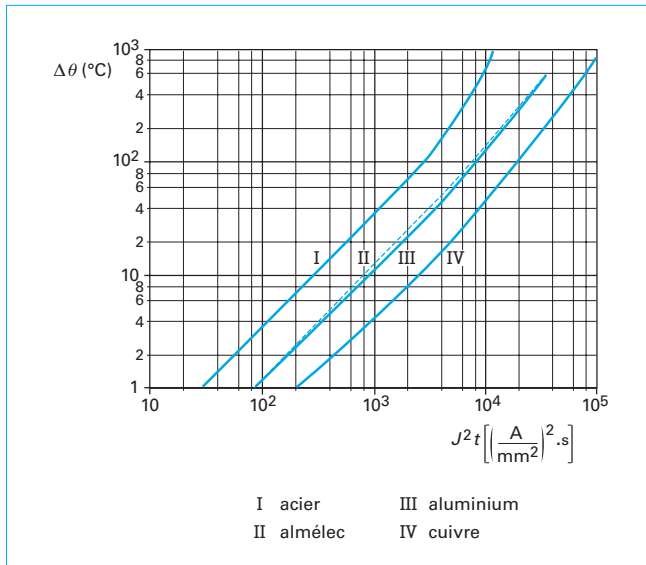
$$CS_c dT/dt = R_{20}[1 + k(T - 293)]I^2 + \kappa W_s \varnothing - 8,55(v\varnothing)^{0,448}(T - T_0) - \varepsilon\pi\sigma\varnothing(T^4 - T_0^4) \quad (1)$$

avec  $C$  (J · m<sup>-3</sup> · K<sup>-1</sup>) capacité thermique volumique du matériau,

$I$ (A)	intensité du courant parcourant le conducteur,
$R_{20}$ (Ω · m <sup>-1</sup> )	résistance linéique du conducteur en courant continu à 20 °C,
$S_c$ (m <sup>2</sup> )	section du câble,
$T_0$ (K)	température ambiante,
$T$ (K)	température du conducteur,
$W_s$ (W · m <sup>-2</sup> )	rayonnement solaire,
$k$ (K <sup>-1</sup> )	coefficient de température du conducteur à masse constante ( $k = 0,036$ K <sup>-1</sup> ),
$v$ (m · s <sup>-1</sup> )	vitesse transversale du vent ( $v = 1$ m · s <sup>-1</sup> ),
$\varnothing$ (m)	diamètre du conducteur,
$\varepsilon$	pouvoir émissif par rapport au corps noir ( $\varepsilon = 0,6$ ),
$\kappa$	coefficient d'absorption solaire,
$\sigma$	constante de Stefan [ $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8}$ W · m <sup>-2</sup> · K <sup>-4</sup> ].

Lors d'un court-circuit, le passage d'un courant de défaut important, mais pendant un temps très court, dans une connexion provoque une élévation de température que l'on peut considérer comme adiabatique : toute l'énergie est accumulée par le conducteur sans échange avec l'extérieur.

L'élévation de température dans le conducteur est déterminée à partir des abaques établis par deux métallurgistes suisses, Gut et Grundberg, en fonction du produit  $J^2 t$  (figure 5) dans lequel  $J$  (A/mm<sup>2</sup>) est la densité du courant de défaut dans le conducteur et  $t$ (s) la durée du défaut.



**Figure 5 – Abaque de Gut et Grundberg. Détermination de l'échauffement  $\Delta\theta$  avec circulation d'un courant de défaut**

Pour connaître la température maximale à laquelle le câble risque d'être porté, l'échauffement dû au passage du courant de court-circuit est ajouté à celui du régime de surcharge d'une durée maximale de 20 min.

### 7.1.3 Tenue mécanique

La tension mécanique des conducteurs doit rester, pour les diverses hypothèses servant de base d'établissement, inférieure à des valeurs maximales indiquées dans le tableau 4.

Cette tension mécanique est calculée, dans les deux premiers cas (vent et givre), à partir des formules classiques de l'équilibre statique des câbles et des équations de changement d'état (voir [D 4 421]) en partant de la connaissance de la portée des connexions, des caractéristiques du câble, des charges ponctuelles appliquées et d'une condition mécanique dans une hypothèse considérée comme référence, généralement une flèche de 3 % pour une température de 45 °C sans vent.

Lors d'un court-circuit, les contraintes engendrées par les efforts électrodynamiques sur les conducteurs peuvent conduire à des tensions mécaniques très importantes. Ces efforts électrodynamiques résultent de la force de Laplace, qui, dans le cas de deux conducteurs parallèles parcourus par un même courant, est proportionnelle au rapport  $I_{cc}^2 / d_c$  dans lequel  $I_{cc}$  est l'intensité du courant de court-circuit et  $d_c$  la distance entre les conducteurs. Pour donner un ordre de grandeur des forces qui apparaissent, considérons deux conducteurs placés à 10 m l'un de l'autre. S'ils sont parcourus tous deux par un courant de court-circuit de 40 kA, la surcharge électrodynamique linéique appliquée à chaque conducteur est supérieure à 100 daN/m.

Ces efforts ne sont pris en compte pour le dimensionnement des conducteurs que dans la mesure où ils sont plus importants que les efforts statiques correspondants dus au vent ou au givre. Pour les dispositions de postes développées ici, l'expérience montre que les efforts électrodynamiques ne deviennent prépondérants que dans les postes à 400, 225 et 90 ou 63 kV dont le niveau de courant de court-circuit est respectivement supérieur à 40, 31,5 et 20 kA (20 kA pour les postes à 90 ou 63 kV).

### 7.1.4 Effet couronne

À partir de l'échelon de tension 225 kV, il convient d'utiliser des conducteurs de diamètre suffisant pour éviter l'apparition d'effluves dues à l'effet de couronne, générateur de pertes et de perturbations radioélectriques.

En particulier, en 225 kV, les câbles de section inférieure à 570 mm<sup>2</sup> présentent un diamètre trop faible et, en 400 kV, les câbles sont obligatoirement disposés par deux, en faisceau, pour augmenter leur diamètre apparent.

## 7.2 Connexions aériennes en tubes

### 7.2.1 Caractéristiques

Les tubes sont utilisés pour la réalisation des jeux de barres, de certaines connexions transversales et de liaisons entre appareils. Ils présentent les avantages suivants :

- une grande rigidité et donc une flèche minimale ;
- une indéformabilité qui permet de respecter plus facilement les distances électriques ;
- une section généralement importante qui autorise le passage de fortes intensités de courant.

D'une façon générale, ils sont réalisés en alliage d'aluminium AGS/L à l'état T6 (trempé-revenu) qui contient, outre l'aluminium, 0,6 % at. de silicium et 0,7 % at. de magnésium.

Le tableau 9 précise les caractéristiques mécaniques des tubes utilisés le plus couramment.

Comme pour les câbles, le choix des tubes est effectué à partir de l'étude de trois paramètres :

- l'échauffement provoqué par le passage du courant ;
- la tenue mécanique ;
- l'effet couronne ;

en utilisant les mêmes méthodes et formules qu'au paragraphe 7.1. Nous ne reviendrons dans les paragraphes qui suivent que sur les points spécifiques aux tubes.

### 7.2.2 Courants admissibles dans les tubes

Le tableau 10 précise les courants admissibles dans les tubes en régime permanent ainsi qu'en régime de surcharge d'une durée maximale de 20 min, en hiver et en été (voir [D 4 572]).

### 7.2.3 Tenue mécanique

Le calcul des contraintes mécaniques et des déformations des tubes sous l'action du poids propre, du vent et du givre se fait en utilisant les formules usuelles de résistance des matériaux. On rencontre habituellement deux géométries dans les dispositions normalisées :

- les tubes en appui libre à une extrémité et encastrés à l'autre ;
- les tubes en console.

**Tableau 9 – Caractéristiques et conditions d'emploi des tubes en alliage d'aluminium**

Désignation (diamètre extérieur × épaisseur) (mm × mm)	50 × 5	80 × 5	100 × 5	120 × 8	200 × 8
Section ..... (mm <sup>2</sup> )	707	1 178	1 492	2 815	4 825
Moment d'inertie <i>J</i> (1) ..... (cm <sup>4</sup> )	18,08	83,05	168,5	443	2 227
Module de flexion <i>J/v</i> (1) ..... (cm <sup>3</sup> )	7,23	20,76	33,70	74	223
Portée maximale (2) ..... (m)	7,33	10,25	12,10	15,00	21,20
Surcharge de givre d'épaisseur 1 cm ..... (kg/m)	1,130	1,695	2,07	2,45	3,95
Surcharge de givre d'épaisseur 2 cm ..... (kg/m)	2,64	3,77	4,53	5,28	8,30
Masse linéique..... (kg/m)	1,91	3,18	4,03	7,65	13,03

(1) grandeur et unité en usage dans la profession

(2) portée d'un tube appuyé à une extrémité et encastré à l'autre, soumis à son propre poids et au vent de l'hypothèse A (voir [D 4 572]), sa flèche étant égale à 1/150 de sa portée.

**Tableau 10 – Courants admissibles dans les tubes en alliage d'aluminium**

Connexions normalisées	Courants admissibles (A)							
	Régime permanent				Surcharge 20 min			
	Saison (1)	Été	Intersaison	Hiver 1	Hiver 2	Été	Intersaison	Hiver 1
Tube AGS 50 × 5	1 750	1 871	1 970	2 086	1 953	2 068	2 154	2 257
Tube AGS 80 × 5	2 598	2 779	2 934	3 107	2 938	3 110	3 224	3 394
Tube AGS 100 × 5	3 123	3 347	3 541	3 755	3 558	3 766	3 932	4 118
Tube AGS 120 × 8	4 498	4 821	5 105	5 413	5 368	5 631	5 867	6 127
Tube AGS 200 × 8	7 344	7 875	8 673	9 224	8 802	9 255	10 047	10 511

(1) voir *Postes à haute et très haute tensions. Dispositions constructives* [D 4 572].

Si *q* (daN/m) est la charge linéique du tube, *ℓ* (m) la portée, *J* (m<sup>4</sup>) le moment d'inertie, *J/v* (m<sup>3</sup>) le module de flexion, *E* (N/m<sup>2</sup>) le module d'Young, les formules suivantes permettent le calcul de la contrainte de flexion maximale *n* et de la flèche maximale *f* pour les deux géométries définies précédemment :

– tubes en appui libre à une extrémité et encastrés à l'autre :

$$n = \frac{q\ell^2}{8J/v} \quad f = \frac{q\ell^4}{195EJ} \quad (2)$$

– tubes en consoles :

$$n = \frac{q\ell^2}{2J/v} \quad f = \frac{q\ell^4}{8EJ} \quad (3)$$

Les conditions mécaniques à respecter sont données dans le tableau 4.

### 7.2.4 Effet couronne

Le tube 50 × 5 (diamètre extérieur en millimètres × épaisseur en millimètres) ne peut être envisagé que pour les échelons de tension inférieure à 400 kV.

Des connexions en faisceaux de deux tubes ne sont pas actuellement envisagées car l'utilisation d'un seul tube de diamètre extérieur et de section convenables est plus simple et moins onéreuse.

### 7.2.5 Vibration

Afin d'atténuer les phénomènes de vibration dus au vent, pour tous les tubes dont le diamètre est supérieur ou égal à 100 mm, un lestage est effectué par l'insertion d'un câble AGS 570 dans ces derniers. Ce câble est fixé d'un côté par un bouchon porte-câble (on prendra en compte la pente parallèle à la barre pour déterminer le côté où le fixer).

## 7.3 Mise en œuvre des connexions aériennes et des raccords

Les raccordements sur les appareils, à l'exclusion des transformateurs de puissance et de certains parafoudres de protection contre les surtensions, sont constitués par des plages planes en alliage d'aluminium, de dimensions normalisées. L'utilisation poussée de connexions de raccordement dont tous les éléments (prises de courant, conducteurs et pièces de raccordement) présentent une homogénéité dans le choix des matériaux constitutifs permet de

limiter de façon appréciable les phénomènes de corrosion dus à la présence de couples électrolytiques. En cas de connexions mixtes (borne en cuivre, raccord en aluminium), on utilise des raccords avec des plaques bimétalliques pour éviter ces problèmes électrolytiques.

### 7.3.1 Connexions tendues en câbles

Elles comportent, à chacune de leurs extrémités, une chaîne isolante qui assure la liaison mécanique et l'isolement électrique avec la charpente. Les câbles sont fixés sur ces chaînes par des manchons d'ancrage comprimés, comportant ou non des plages de dérivation.

Ces dérivations, simples ou en faisceau, peuvent être établies soit au niveau de ces ancrages, soit en pleine portée au moyen de manchons de passage ou de coquilles de dérivation.

### 7.3.2 Connexions semi-tendues en câbles

Elles comportent généralement une longueur de câble en almélec homogène, terminée à chaque extrémité par une cosse de raccordement.

### 7.3.3 Connexions en tubes

Chaque portée est normalement rectiligne et comporte une extrémité fixe et une extrémité souple de manière à absorber l'effort longitudinal de dilatation. De plus, chaque raccord porte-tube peut former un angle de 6° avec l'horizontale. On peut ainsi, sans précaution particulière, installer des jeux de barres sur des terrains dont la pente atteint 5 %.

La soudure de tubes bout à bout autour d'un manchon intérieur est possible par un procédé classique sous atmosphère inerte. La baisse de caractéristiques mécaniques de l'alliage à la jonction est compensée par le renforcement dû au manchon intérieur.

Pour les grandes portées, un contre-fléchage peut être effectué soit en usine, soit sur le chantier, de manière à compenser la flèche. De plus, un perçage tous les 2 m est réalisé en partie basse pour éviter les phénomènes de condensation à l'intérieur du tube.

Les extrémités des tubes sont obturées par des bouchons pour supprimer toute intrusion.

### 7.3.4 Raccords

**Nota** : les raccords pour tubes répondent à la norme NF C64-021.

Les raccords qui relient les éléments en alliage d'aluminium sont intégralement composés de pièces réalisées en un des alliages suivants, désignés conformément à la norme NF EN 573-1 ou à la norme NF EN 1754 (voir *Conducteurs métalliques* [D 2 611]) :

- (A-S 7 G) traité thermiquement (état Y 23 ou Y 33) pour les parties destinées à subir des contraintes mécaniques élevées ;
- 6101 (AGS) pour certains raccords de câbles avec manchon à comprimer ;
- 1050A (A5) pour certains raccords de câbles avec manchon à comprimer, ainsi que pour la réalisation des shunts électriques des raccords de tubes munis d'un dispositif de dilatation ;
- 7075 (AZ 5 GU) pour la boulonnerie (traitement thermique T 73).

**Nota** : l'ancienne désignation est indiquée entre parenthèses.

D'une façon générale, les raccords doivent être dimensionnés de façon que :

– le courant permanent maximal admissible ainsi que le courant de court-circuit ne puissent provoquer dans leurs pièces constituant un échauffement supérieur à celui provoqué dans les conducteurs raccordés ;

– la résistance mécanique des différentes pièces soit suffisante pour que les raccords résistent aux efforts statiques dus aux charges climatiques sur les connexions raccordées et aux efforts électrodynamiques en cas de court-circuit (conditions à respecter dans le tableau 4).

## 8. Liaisons souterraines

**Nota** : les câbles isolés à haute tension répondent à la norme NF C33-210. Le lecteur est invité à se reporter, pour la description des différentes technologies utilisées pour la fabrication de ces câbles, aux dossiers *Câbles de transport d'énergie* [D 4 520] [D 4 521].

Plusieurs techniques de pose sont utilisées :

– la pose en caniveau (figure 6). L'utilisation des liaisons souterraines est justifiée lorsqu'il n'est pas possible d'employer des liaisons aériennes en câbles ou en tubes (§ 7) ;

– la pose en fourreaux (figure 7) ;

– la pose en mortier maigre (figure 8).

Dans le cas de la pose en fourreaux, deux dispositions sont possibles :

– la disposition en trèfle, la plus courante (figure 7a) ;

– la disposition en nappe, utilisée sous les zones de circulation uniquement (figure 7b).

Pour les liaisons doubles, quelle que soit la technique de pose, les ternes doivent être disposés en parfaite symétrie pour éviter une mauvaise répartition des courants dans les câbles.

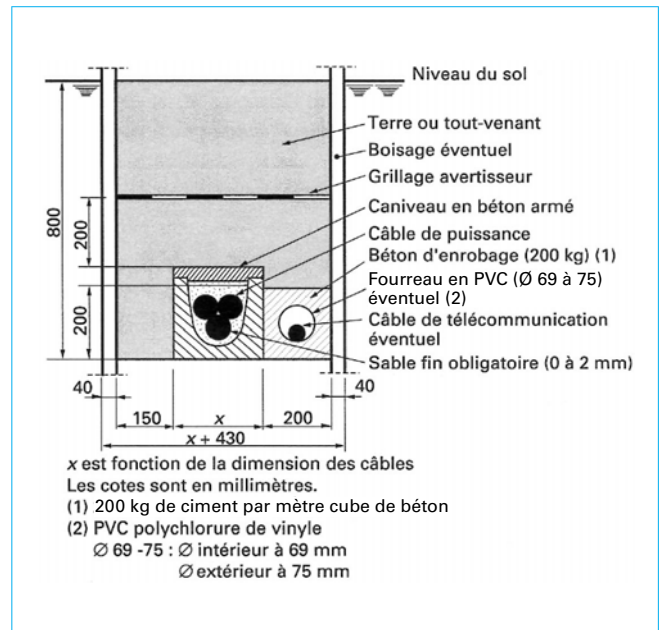
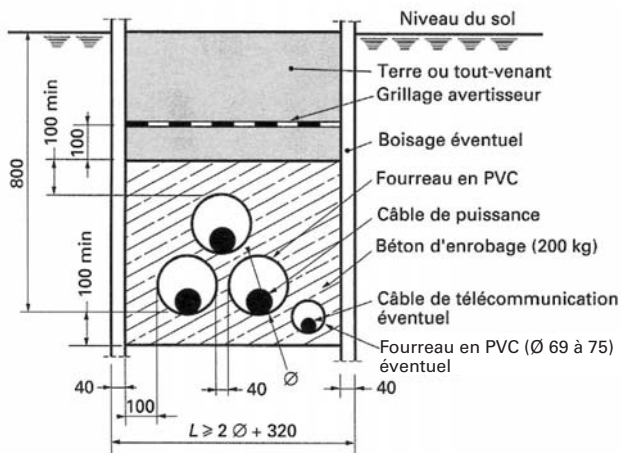


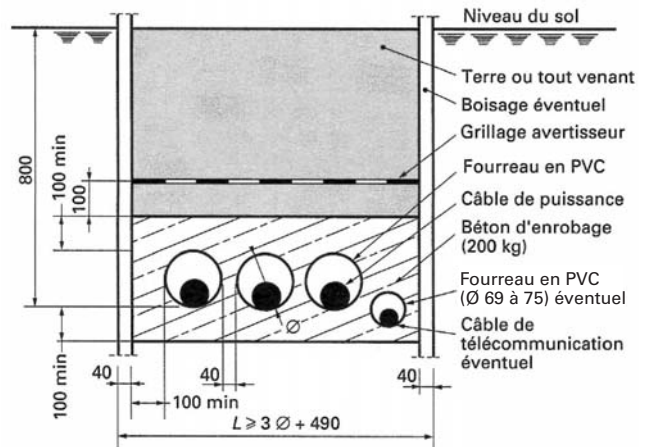
Figure 6 – Pose d'une liaison en caniveau





Dans le cas de passages en fourreaux (traversées de chaussées, obstacles ponctuels, etc.) sur un tracé en caniveaux, la disposition des fourreaux trèfle tête en bas est recommandée.

**(a) disposition en trèfle (tête en haut)**

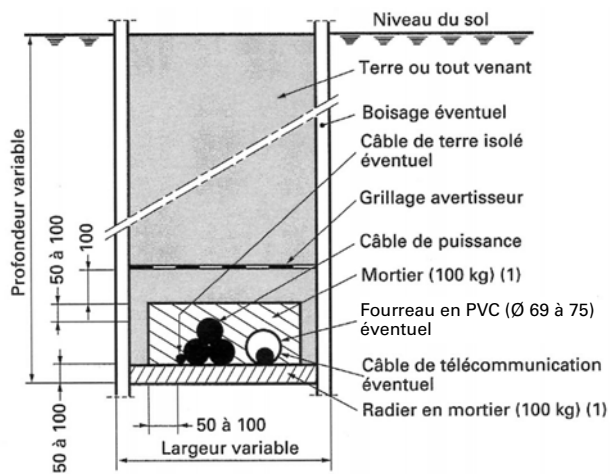


Ce mode de pose est exceptionnel même aux passages particuliers.

**(b) disposition en nappe**

Les cotes sont en millimètres.

**Figure 7 - Pose d'une liaison en fourreaux**



Les cotes sont en millimètres.

(1) 100 kg de ciment par mètre cube de béton  
Les profondeurs de pose sont 1 300 mm en domaine public et 1 000 mm en poste.

**Figure 8 - Pose d'une liaison (63 ou 90 kV) en mortier maigre**