

Annexe A19.6.

Les pylônes

(compléments)



Fig. A19.6-1

A19.6.1. Généralités

Une ligne aérienne haute tension compte en général 3 câbles électriques les uns à côté des autres. Lorsqu'une ligne est composée de 6 câbles, il s'agit en fait de 2 lignes différentes (3 câbles par ligne). Un câble supplémentaire, appelé câble de garde est généralement disposé au-dessus de la ligne de transport et la protège de la foudre.

Des pylônes ou supports maintiennent ces câbles à une certaine distance du sol de façon à assurer la sécurité des personnes et des installations situées au voisinage des lignes. Ce sont des maillons nécessaires à la constitution des lignes aériennes de transport et de distribution de l'électricité.

De forme et d'importance très variées, les supports peuvent aller des simples poteaux en bois ou en béton, d'une douzaine de mètres en hauteur, aux pylônes treillis d'acier, de plus de 50 m de hauteur et ayant une masse pouvant atteindre, voire dépasser 100 t.

Les supports sont définis en fonction des contraintes mécaniques principalement créées par les conducteurs qu'ils supportent et en fonction des contraintes d'isolement électrique.

- la tension
- l'aspect des lieux
- le respect de l'environnement
- les conditions climatiques

Cet annexe présente les principales règles de conception des supports de lignes aériennes. Il y est fait également un inventaire des solutions techniques largement éprouvées mais également des solutions nouvelles prenant en compte les évolutions réglementaires ou environnementales.

A19.6.2. Matériaux utilisés

Les supports de lignes aériennes sont, couramment, des poteaux de bois ou de béton armé, des assemblages (portiques) de pièces de bois ou de béton armé ou des constructions métalliques de formes et d'importances très variées, allant de la simple *poutrelle* aux *pylônes* métalliques en *treillis*.

A19.6.2.1. Le bois

Les essences de bois utilisées sont presque toujours des résineux que l'on imprègne de produits antiseptiques pour les protéger contre les attaques biologiques par insectes et champignons.

Pour plus de précision, on peut se reporter à la norme NF C 67-100. Cette norme fixe les conditions relatives au bois (pin, sapin, épicéa, douglas ou mélèze), les modes de traitement des poteaux et leurs conditions de réception.

A19.6.2.1.1. Procédés de traitement

Les procédés d'injection, sélectionnés dans une longue liste, ont donné dans le passé des résultats plus ou moins valables. Les traitements à la créosote assurent une durée de vie moyenne de 35 à 40 ans et ceux aux sels complexes sont actuellement utilisés de façon générale.

Les prescriptions de sécurité (UTE C 18-510) interdisent de monter sur tout support sans s'être assuré au préalable de son bon état. En ce qui concerne les supports en bois, l'examen de l'aspect extérieur ne suffit pas, car ils peuvent se détériorer de l'intérieur. Deux techniques sont employées pour évaluer l'état du poteau :

- l'une, traditionnelle, consiste à sonder la surface du poteau au marteau pour s'assurer qu'il ne sonne pas creux ;
- l'autre, plus récente mais aussi plus objective, mesure l'effort de pénétration dans le bois de 2 aiguilles de faible diamètre ainsi que la résistivité du bois à l'extrémité de ces aiguilles qui jouent un rôle d'électrodes. Plus la résistivité est faible plus le taux d'humidité est fort : ce qui illustre la présence de pourriture.

A19.6.2.1.2. Propriétés des poteaux en bois

Les supports en bois présentent certains avantages :

- leur légèreté, qui rend plus faciles leur transport et leur mise en place ;
- leur prix peu élevé, compensé d'ailleurs en partie par l'impossibilité de réaliser de longues portées ;
- leur grande flexibilité : un poteau en bois est capable de prendre de très grandes flèches sans se rompre, et se déforme de façon appréciable pour des efforts faibles ; il permet ainsi de réduire beaucoup les inégalités de tensions entre portées et d'assurer une bonne tenue de la ligne en cas de givrage dissymétrique.

A19.6.2.1.3. Caractéristiques mécaniques

Le poteau en bois est, en France, utilisé surtout pour les lignes BT et HTA. Pour les tensions électriques plus élevées, le poteau en bois est utilisé en portique, notamment en secteur givrabie.

Les poteaux simple (S), désignés par leur effort nominal en tête (exprimé en daN),

S 100 ; S 140 ; S 190 ; S 225

sont employés couramment ; exceptionnellement, on utilise les poteaux

S 325 ; S 430 ; S 550

L'effort de déformation permanente ne dépasse pas 110 daN pour un poteau S 325. Au-delà, on a recours aux assemblages de poteaux (jumelés, contrefichés, haubanés), si les conditions d'encombrement le permettent.

On rappelle que l'effort nominal en tête est l'effort appliqué à 0,25 m du sommet du support, dans la direction soumise à l'effort le plus élevé.

La norme NF C 67-100 donne, également, des précisions sur le calcul de l'effort nominal. On admet comme contrainte de rupture à la flexion 55 MPa.

De plus, à chaque type de poteau correspond un effort de déformation permanente, qui est l'effort à ne pas dépasser sans risque de flèche permanente du support, indépendamment de toute notion de sécurité. Cet effort est, bien entendu, à considérer dans le cas des supports d'angle et d'arrêt (NF C 11-201).

Les longueurs normalisées des poteaux vont de 8 à 15 m. Il existe cependant des longueurs plus petites ou plus grandes, ces dernières pouvant être utilisées pour la réalisation de portiques pour lignes HTB.

A19.6.2.1.4. Bois lamellé-collé

On appelle bois lamellé-collé des pièces massives reconstituées à partir de lamelles de bois, de dimensions relativement réduites par rapport à celles de la pièce, assemblées par collage. Ces lamelles sont disposées de telle sorte que leurs fils soient parallèles. On emploie, habituellement, les deux essences suivantes : épicea commun et pin sylvestre.

La technique du bois lamellé-collé s'adapte parfaitement à la réalisation de poteaux. Leur légèreté et la résistance du bois lamellé-collé (contrainte de rupture axiale voisine de 50 MPa) leur permettent de remplacer les poteaux en béton, même d'effort nominal important ($> 1\,000$ daN).

Leur prix reste encore élevé par rapport aux poteaux en béton et leur utilisation ne peut se concevoir que lorsque les contraintes d'accessibilité au lieu d'implantation interdisent la manutention de supports monolithiques trop lourds ; ils permettent de réaliser des lignes sur supports homogènes s'intégrant bien dans l'environnement et donc de pallier les insuffisances mécaniques présentées par les poteaux en bois normalisés (utilisation en angle ou en arrêt).

Différentes réalisations expérimentales ont démontré la faisabilité de supports en lamellé-collé ayant plus de 20 m de hauteur et adaptés à des lignes à 63 ou 90 kV à deux circuits.

A19.6.2.2. Bétons armé et précontraint

La mise en œuvre est identique pour les deux types de béton. Il est fabriqué à partir de constituants normalisés et agréés (ciments, granulats, eau). Il est coulé dans le moule après malaxage et tassé mécaniquement par vibration, soit interne (pervibration), soit du moule. Le béton des poteaux à section circulaire (ou elliptique) est tassé par centrifugation. Des précautions doivent être prises en cas de gel pour les poteaux venant d'être coulés dans les 24 heures précédant le gel.

La cure, qui a pour but de maintenir le béton dans l'état d'humidité favorable à son durcissement, permet d'atténuer les inconvénients du retrait du béton. Elle est indispensable et est réalisée soit par application sur la surface des poteaux d'un produit retardant l'évaporation, soit en maintenant les poteaux, pendant les quelques premiers jours faisant suite à la coulée, dans un milieu dont l'humidité est voisine de la saturation.

A19.6.2.2.1. Béton armé

Les poteaux en béton armé sont généralement obtenus par moulage ; ils comprennent une armature longitudinale faite de ronds en acier maintenus par des étriers. L'armature est mise en place dans le moule et convenablement positionnée à l'aide de cales en béton ; cette opération demande à être faite avec beaucoup de soin afin d'éviter un décentrement préjudiciable à la fois à la conservation du poteau (couverture de béton insuffisante) et à son comportement mécanique

- Propriétés des poteaux

Bien que plus lourds et plus chers que les poteaux en bois, les poteaux en béton armé ont l'avantage d'être fabriqués dans une gamme très étendue de résistances et de hauteurs, en particulier pour les fortes valeurs d'effort nominal. Ils peuvent être utilisés pour des conducteurs d'assez forte section et pour des portées d'assez grande longueur.

Cela permet donc de diminuer le nombre de poteaux par kilomètre, paramètre dont il faut tenir compte pour une comparaison correcte entre les prix de revient d'une ligne sur poteaux en bois et d'une ligne sur poteaux en béton.

- Caractéristiques - Dimensions

La norme sur les poteaux en béton armé (NF C 67-200) fixe les conditions relatives aux matériaux utilisés, les efforts conventionnels pour lesquels les poteaux sont conçus, les dispositions constructives des poteaux et les conditions de réception.

L'effort nominal F disponible en tête des poteaux normalisés va de 150 à 3 200 daN, leur hauteur de 9 à 28 m. La série la plus couramment utilisée pour les lignes HTA comporte les supports de 200 à 1 000 daN et de 10 à 14 m de hauteur.

Dans le cas de l'utilisation avec un armement reportant l'effort au-dessus du sommet, l'effort disponible devient kF , k dépendant de la hauteur d'application de cet effort au-dessus du sommet et donné par la norme.

Par exemple, pour un armement nappe-voûte reportant l'effort à 0,75 m au-dessus du sommet,

$$k = 0,9$$

ce qui veut dire qu'un poteau d'effort nominal F aura alors un effort disponible de $0,9 F$.

Le poteau doit également supporter les effets du vent sur sa propre structure (vent propre sur les surfaces planes et sur les surfaces diamétrales des poteaux à section circulaire). Pour cela, il est calculé pour tenir le vent de l'hypothèse A de l'Arrêté interministériel en vigueur lors de sa construction.

L'effort disponible est donc essentiellement utilisé pour supporter les efforts appliqués au poteau par l'intermédiaire des conducteurs, indépendamment de l'effet du vent sur le poteau lui-même.

Les poteaux en béton armé sont également caractérisés par leur classe, définie par le facteur de résistance transversale χ ; ce facteur, valable pour toutes les sections du poteau, est le rapport des moments résistants respectivement dans le plan perpendiculaire à l'effort nominal et dans celui de l'effort nominal.

Trois classes existent :

- A correspond à un facteur χ variable de 0,30 à 0,40 en fonction de F ;
- B correspond à $\chi = 0,60$;
- C correspond à $\chi = 1,00$.

- Justification de résistance à la rupture des poteaux

La norme NF C 67-200 spécifie que la justification de résistance est en général apportée par des essais à la rupture (essais de désagrégation) ou, dans le cas de poteaux exceptionnels ou en très petit nombre d'exemplaires, par une note de calcul à la rupture donnant le coefficient de sécurité global stipulé à l'Arrêté interministériel et dont la valeur minimale a été fixée à 2,10.

Lorsqu'il y a des essais, un essai du comportement élastique du poteau est effectué en vue de vérifier la conservation de l'adhérence acier-béton.

- Manutention des poteaux

Les poteaux en béton armé sont lourds et difficilement maniables. De plus, ils sont relativement fragiles et peuvent se fissurer. Le fabricant doit donner, dans la fiche caractéristique de chaque type de poteau, la position du centre de gravité et les deux points utiles pour la manutention.

A titre indicatif, les dimensions et masses approximatives ci-après, qui peuvent d'ailleurs varier notablement d'un fabricant à l'autre, donnent une idée de l'importance relative de ces supports :

- poteau 11-A-200	{	dimensions en tête	= 100 x 160 mm
		dimensions au pied	= 188 x 380 mm
		masse	= 800 kg

[avec 11 : hauteur (en m) ; A : classe ; 200 : effort (en daN)] ;

- poteau 21-B-2000	{	dimensions en tête	= 235 x 370 mm
		dimensions au pied	= 424 x 748 mm
		masse	= 8 000 kg

[avec 21 : hauteur (en m) ; B : classe ; 2 000 : effort (en daN)].

- Utilisation des poteaux en flexion déviée

Lorsque les poteaux sont soumis à un effort non situé dans le plan vertical de l'effort nominal (par exemple pour un poteau en ancrage placé à l'angle d'un tracé et séparant deux cantons de portées moyennes différentes, ou pour un poteau d'alignement dont les portées subissent une surcharge dissymétrique de givre et un vent de direction perpendiculaire à la ligne), leur utilisation peut se faire ainsi : l'effort disponible F_ψ , dans la direction faisant un angle ψ avec l'axe principal OA du poteau (figure A19.6-2), doit être limité à la droite de pente χ , passant par A tel que OA soit égal à la valeur de l'effort F disponible en tête du poteau dans l'hypothèse de charge considérée.

Dans le cas d'hypothèse administrative de tempête, OA est au plus égal à l'effort nominal du support.

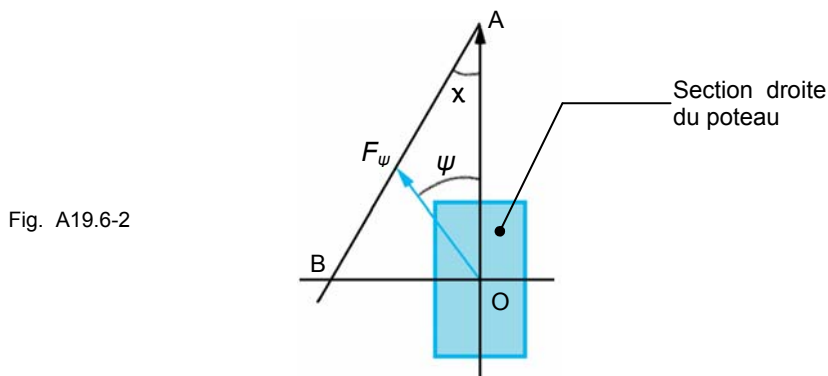


Fig. A19.6-2

F effort disponible
 χ facteur de résistance transversale du poteau
 $OB = \chi OA$

- Tenue en torsion des poteaux

Les poteaux en béton ne sont pas calculés actuellement pour pouvoir résister à la torsion. Or des efforts de torsion apparaissent fréquemment, en particulier en cas de charge dissymétrique de givre ou de rupture d'un conducteur de phase. Le calcul de la résistance à la torsion peut se faire d'une façon simple en ne faisant intervenir que les dimensions des sections de béton en tête du support et la contrainte tangentielle à la traction du béton. On a :

$$c_{tor} = \sigma_t a^2 b / k'$$

avec a et b longueurs des deux côtés du rectangle figurant la section du béton située juste sous la ferrure de fixation de l'armement ($b > a$),

c_{tor} couple de torsion appliqué en tête du support,

k' coefficient dépendant des caractéristiques géométriques de la section et de valeur,

$$k' = 4,81 - \frac{1,81(b - a)}{\sqrt{2a^2 + b^2}}$$

σ_t contrainte tangentielle à la traction du béton ; sa valeur peut varier fortement en fonction de la position des armatures transversales (cadres ou étriers) ; des essais effectués sur les supports actuellement réalisés montrent que, si l'on choisit pour contrainte tangentielle maximale la contrainte de rupture à la traction du béton, la sécurité est respectée.

A19.6.2.2.2. Béton précontraint

Les supports en béton précontraint représente environ le quart des supports en béton utilisés annuellement en France.

La technique de mise en œuvre employée est celle de la précontrainte par fils ou câbles adhérents, c'est-à-dire que les armatures de précontrainte sont tendues avant bétonnage en prenant appui sur des butées extérieures, leur tension se reportant sur le béton lorsque celui-ci a acquis une résistance suffisante, le durcissement étant parfois accéléré par étuvage.

Ces poteaux comportent, outre les barres tendues avant bétonnage, dites actives, des barres inertes, dites passives, qui permettent d'obtenir le coefficient de sécurité global de 2,10, suffisamment éloigné du coefficient de première fissuration (pris égal à 1,00 ou 1,25) et d'éviter aussi une trop grande fragilité du support. En effet, si ces deux coefficients étaient très proches (cas de la précontrainte totale), il y aurait risque de ruine complète du support (par exemple par explosion du béton) dès l'apparition des premières fissures ou lors d'un choc.

Les poteaux en béton précontraint présentent les avantages qui suivent :

- à effort nominal égal, ils sont beaucoup plus légers que les poteaux en béton armé ;
- le contrôle de fabrication est facilité par ce mode de construction ; en effet, toute dissymétrie dans la tension des armatures ou toute mauvaise qualité du béton se manifeste lors du relâchement de la tension des aciers, soit par une rupture du béton, soit par une courbure excessive du poteau ;
- la déformation en tête sous effort nominal, à cause de la haute résistance du béton (généralement supérieure à 60 MPa), est beaucoup plus faible que celle (30 à 40 MPa) du poteau en béton armé de mêmes caractéristiques ; cet avantage, surtout esthétique, peut être déterminant dans le choix des supports pour les lignes à basse tension à branchements multiples, qui soumettent les poteaux à des efforts permanents.

Enfin, les poteaux en béton précontraint ne se fissurent que pour un effort supérieur à leur effort nominal, contrairement aux poteaux en béton armé qui peuvent se fissurer soit par la manutention, soit pour des valeurs d'effort appliqué en tête pouvant descendre jusqu'à la moitié de l'effort nominal. Dans les régions où les aciers risquent de se corroder (régions en bord de mer par exemple), l'avantage du béton précontraint est très net, en particulier pour les poteaux soumis à des efforts permanents (poteaux d'angle).

Les poteaux en béton précontraint sont normalisés (NF C 67-250) ; leur désignation et leur implantation sont identiques à celles des poteaux en béton armé. Un essai complémentaire de contrôle du coefficient de fissuration est exigé ; il permet de se rendre compte de la valeur de la précontrainte du béton.

A19.6.2.2.3. Évolution de la conception des lignes de distribution sur supports en béton

La politique définie vers les années soixante orientait le choix des supports en béton vers des poteaux de classe A qui permettent de résoudre tous les cas d'utilisation classique en alignement. Or des incidents graves ont été constatés vers les années soixante-dix dans des zones très diverses où certaines lignes, construites suivant les hypothèses habituelles, n'ont pas résisté à des surcharges accidentelles (neige collante, par exemple).

Des études théoriques et pratiques ont porté sur le comportement de l'ensemble des éléments d'une ligne, c'est-à-dire les conducteurs, les isolateurs, les supports, les armements et les massifs de fondation. L'une des conclusions était la nécessité d'une bonne coordination mécanique entre les divers éléments de cette chaîne, dont un maillon doit jouer le rôle de fusible en cas de dépassement des contraintes admissibles.

Cet élément fusible est en général l'armement sur les supports d'alignement, mais peut aussi être une disposition spéciale de fixation de l'armement sur le support, comme dans le cas d'une poutre déformable ou rotative. Cette coordination nécessite une connaissance du comportement des poteaux non seulement aux efforts de flexion, mais aussi, en tête, aux efforts de torsion.

De nouvelles règles de calcul des lignes aériennes se sont dégagées et conduisent à mieux limiter les conséquences de surcharges exceptionnelles sur les lignes HTA.

L'attention a été notamment attirée sur le choix de la classe du support. Les études économiques ont en effet montré que, pour limiter l'importance des dégâts en cas d'efforts exceptionnels appliqués aux lignes, il conviendrait de faire appel à des supports de classe B ou C de préférence à des supports de classe A qui devraient, pour tenir en torsion, être surcalibrés, compte tenu de leur faible résistance transversale.

Toutes ces études ont permis de définir un *poteau distribution* (NF C 67-220) qui peut être réalisé aussi bien suivant la technique du béton armé que suivant celle du béton précontraint.

Il y a deux classes (D et E) pour ce poteau distribution, qui présente toutes les caractéristiques nécessaires à une ligne de distribution HTA :

- valeurs de χ (rapport entre l'effort longitudinal et l'effort transversal pour chaque section droite du poteau) appropriées à l'utilisation des supports :
 - pour les alignements : 0,5 (classe D),
 - pour les angles et les arrêts : 1 (classe E voisine de la classe C actuelle) ;
- tenue suffisante à la torsion ;
- caractéristiques propres à faciliter son exploitation :
 - normalisation des dimensions en tête et au pied,
 - rupture localisée à une certaine hauteur (quelques mètres) en cas de dépassement des efforts nominaux.

Pour les **lignes HTB**, on a, également, jugé utile de définir un poteau de **classe F** équirésistant, poteau réalisable soit en une seule partie jusqu'à 28 m de hauteur, soit en deux parties assemblées sur chantier permettant d'atteindre des hauteurs de 35 m. Ces ouvrages lourds ne sont utilisables que dans des lieux d'accès facile pour les engins de manutention, mais sont, alors, d'un prix compétitif avec celui des supports métalliques monopodes réalisés en tôle.

A19.6.2.3. Acier

Quel que soit l'effort appliqué, les tubes et profilés d'acier se prêtent naturellement à la fabrication de toute espèce de support ou d'élément de support que l'on peut désirer (ferrures d'armement pour les supports en bois et en béton, poteaux formés d'une simple poutrelle en fer ou de section plus compliquée, pylônes à treillis de toutes formes et de toutes dimensions). Une des caractéristiques intéressantes des ensembles composés en acier est qu'ils peuvent se transporter et se monter par éléments, car leur assemblage est pratiquement toujours réalisé par boulonnage. Dans un élément, certains assemblages de barres peuvent se faire par soudure. Cette technique est fréquemment utilisée sur les pylônes constitués d'éléments tubulaires, où la réalisation de pièces de jonction est très complexe.

A19.6.2.3.1. Protection contre la corrosion

- Galvanisation à chaud

Les pylônes sont généralement galvanisés à chaud pour être protégés de l'oxydation due à l'humidité ou aux pollutions marines ou industrielles.

Cette galvanisation consiste à **recouvrir les aciers d'une couche de zinc**. La durée de vie du revêtement de zinc est grande si le traitement a été bien fait : pureté et température du bain, durée du trempage (UTE C 66-400). La durée de la protection dépasse souvent 30 ans, mais est réduite au voisinage de la mer et dans les régions industrielles. En effet, l'épaisseur du revêtement de zinc est, au minimum, de 70 μm mais, en valeur moyenne, proche de 100 μm . Dans les régions fortement corrosives, une perte annuelle de revêtement de zinc de 10 μm peut être observée.

Il faut signaler qu'une bonne galvanisation ne peut s'effectuer que sur des aciers aptes à la galvanisation (NF A 35-503) comportant un taux limité de silicium et de silicium-phosphore. Une forte teneur en silicium conduit à des surépaisseurs de couches d'alliage de fer-zinc présentant une mauvaise adhérence et une coloration brunâtre d'un très mauvais aspect.

- Dans certains pays étrangers (surtout américains), les **aciers du type semi-oxydable** (en particulier, acier *Corten* : acier au chrome-cuivre-nickel) ont été utilisés dans les milieux très corrosifs. Les essais ont montré que la perte en épaisseur, au bout d'une dizaine d'années d'exposition dans des atmosphères salines ou industrielles, était trois fois moins importante que pour un acier au carbone.

Le gain sur le poids de la structure, dû principalement à l'épaisseur minimale plus faible des profilés, ainsi que la suppression des frais de revêtement et d'entretien peuvent rendre, dans certains cas, cette solution compétitive. Toutefois, compte tenu de la teinte couleur rouille et du dépôt pulvérulent en surface salissant les monteuses de lignes, cette technique a pratiquement été abandonnée pour les supports de lignes aériennes.

A19.6.2.3.2. Nuances d'acier et types de profilés utilisés

Conformément aux prescriptions de la norme NF EN 10025, les nuances d'aciers les plus utilisés en France sont :

- S235 JR (résilience minimale de 27 J à une température de l'acier de 20 °C) et
- S355 J0 (résilience minimale de 27 J à une température de l'acier de 0 °C).

L'acier S235 (anciennement appelé acier E24) convient plus particulièrement aux barres de grand élançement mécanique, telles que les diagonales et les treillis de contreflambement.

L'acier S355 (anciennement appelé acier E36) est réservé aux barres de faible élançement mécanique telles que les membrures. Il permet des gains appréciables de masse mais est d'un prix plus élevé que l'acier S235.

On rappelle que l'élançement mécanique est le rapport de la longueur de flambement de la barre à son rayon de giration.

• Tous les profilés laminés à chaud peuvent être employés dans la construction des supports, mais les pylônes à treillis sont généralement constitués de cornières soit au dixième (rapport de l'épaisseur à la largeur de l'aile égal à 1/10), soit amincies (allant jusqu'au quinzième).

L'emploi de cornières à ailes amincies améliore, à masse égale, la tenue au flambement des barres d'une structure. En effet, dans une gamme importante d'élançements, l'effort admissible en compression, à section égale, est en principe d'autant plus grand que l'aile est plus mince. Toutefois, deux phénomènes limitent l'amincissement de l'aile :

- le flambement local, qui consiste en l'apparition de plis sur le bord de l'aile ;
- le flambement spatial, qui est une combinaison du flambement de flexion et du flambement de torsion et se traduit par une rotation de la section médiane par rapport aux sections extrêmes.

C'est pourquoi la minceur 15 représente pour l'acier une valeur limite.

Des profilés en tôle pliée, sont actuellement proposés pour la réalisation de supports allégés dans un but esthétique (par exemple pour les supports monopodes de type *muguet*). Leur compétitivité reste à démontrer économiquement.

A19.6.2.4. Alliage d'aluminium

Certains alliages d'aluminium (magnésium et silicium) ont été utilisés pour la réalisation de pylônes, pratiquement toujours dans des régions définies soit par leur agressivité (bord de mer ou proximité de complexes sidérurgiques ou chimiques), soit par leur relief (difficultés d'accès).

A19.6.2.5. Comparaison de l'acier et de l'alliage d'aluminium

• La tenue de l'alliage d'aluminium au flambement est, pour un même profilé, moins satisfaisante qu'avec l'acier, par suite du faible module d'élasticité de ce matériau (70 000 MPa au lieu de 200 000 MPa pour l'acier). Par contre, les procédés de fabrication des profilés en alliage d'aluminium (filage) permettent d'obtenir facilement une section bien adaptée aux efforts de flambement. La tenue d'un tel profilé n'est donc pas absolument comparable à celle d'un profilé d'acier ; aussi convient-il de rechercher les meilleures conditions d'emploi, ce qui conduit à concevoir des structures en alliage d'aluminium différentes de celles qui sont établies en acier.

• Compte tenu des études sur l'utilisation de ces matériaux et également de leurs prix actuels, le **coût**, montage compris d'un pylône en alliage d'aluminium en terrain facile est plus cher (de l'ordre de 20 %) que le pylône en acier galvanisé de même utilisation. Mais il faut faire intervenir, dans une comparaison complète, la plus grande facilité de montage des pylônes en alliage d'aluminium car, compte tenu de leur poids (un pylône en aluminium a une masse environ trois fois plus faible qu'un même pylône en acier), ils ne nécessitent que des engins de manutention très légers qui ne demandent généralement pas la réalisation de voies d'accès importantes.

De plus, l'utilisation d'hélicoptères pour le transport de pylônes complets à partir d'aires de montage centralisées est une solution qui doit être envisagée, alors que pour l'acier elle n'est possible que par l'utilisation d'hélicoptères lourds (qui n'existent pas encore de façon courante) ou par un transport de pylône en acier, par tronçons, ce qui augmente les rotations de l'hélicoptère, donc accroît le prix du montage. Cette solution ne peut être intéressante que dans les régions d'accès difficile. Elle est fréquemment utilisée dans les pays scandinaves.

A19.6.3. Différentes dispositions des conducteurs

La silhouette des supports et leurs dimensions en largeur se trouvent déterminées par la disposition des conducteurs, compte tenu des distances minimales à respecter entre conducteurs et masse et entre les conducteurs eux-mêmes.

Les différentes dispositions des conducteurs (ou armements de la ligne) ainsi que les avantages et inconvénients de ces principaux modes d'armement sont donnés ci-après.

A19.6.3.1. Armement en triangle

L'armement en triangle consiste à disposer les câbles d'alimentation aux sommets d'un triangle virtuel. La figure suivante donne quelques exemples de cette disposition :

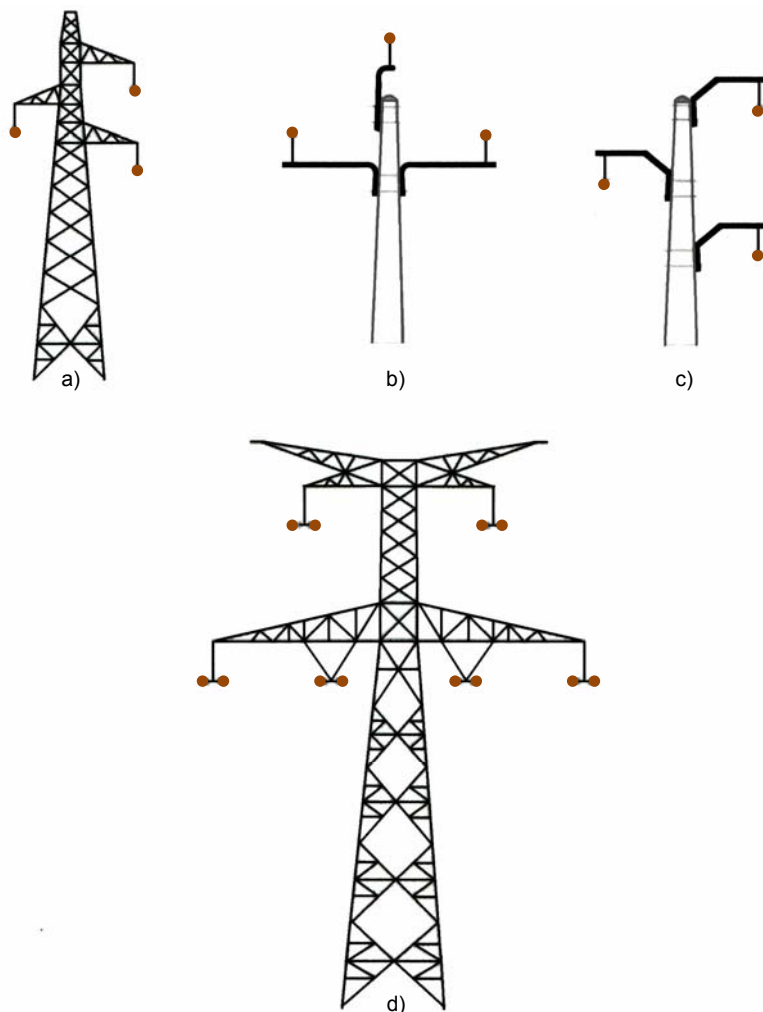


Fig. A19.6-3

- a) pylône pour ligne HTB (90 kV)
- b) chapeau de gendarme ; pylône pour ligne HTA, avec isolateurs rigides
- c) armement alterné avec bras inclinés ; pylône pour ligne HTA, avec isolateurs suspendus
- d) pylône pour ligne HTB à 400 kV, à 2 circuits, type Beaubourg

Cet armement exige des dimensions transversales réduites, donc permet d'obtenir assez facilement une bonne tenue du support aux efforts de torsion, mais la hauteur est nécessairement élevée.

Pour éviter le télescopage des deux conducteurs situés du même côté du support, en cas d'oscillations verticales résultant de détente après rupture ou de charges dissymétriques de givre, on dispose généralement ces deux conducteurs dans deux plans verticaux suffisamment distants (figures A19.6-3a), A19.6-3c) et A19.6-3d)).

La disposition en triangle symétrique par rapport à l'axe du support [armement en chapeau de gendarme, (figure A19.6-3b)) réduit le plus possible les inconvénients précités, mais n'est commodément réalisable que pour les lignes à tension assez basse, à isolateurs rigides, l'un des conducteurs étant attaché à un isolateur placé en tête de support ; pour les lignes à haute tension, ce type d'armement, fréquemment utilisé en Amérique du Nord, est réalisé à l'aide d'isolateurs rigides en porcelaine et, souvent, en matériaux synthétiques.

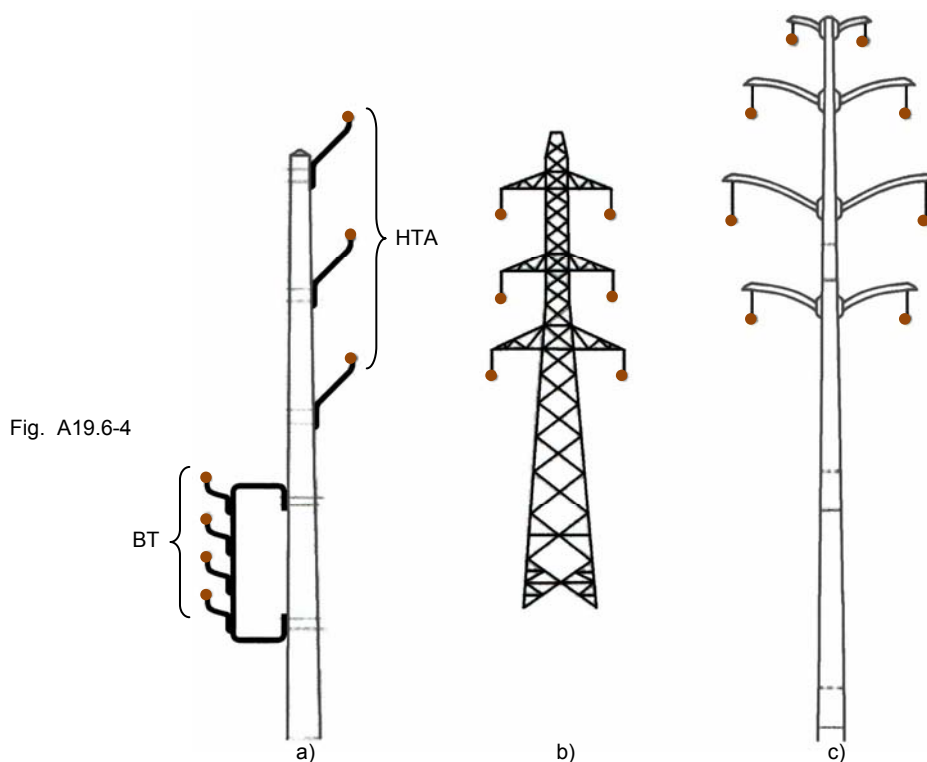
A19.6.3.2. Armement en drapeau

Il est peu fréquent pour les lignes HTB à un seul circuit (sauf pour certains angles), mais assez habituel pour les lignes HTA et BT (figure A19-6-4a).

En HTB, cette disposition est utilisée pour les lignes à deux circuits (figures A19-6-4b et c).

Cet armement présente, accrus, les défauts de l'armement en triangle, mais cette disposition est pratiquement imposée pour un grand nombre de lignes, notamment en HTB, lorsque l'encombrement en projection horizontale est limité (zones fortement urbanisées, en traversées de forêts).

La figure suivante A19.6.4 illustre quelques exemples d'armement en drapeau.



- a) pylône pour ligne mixte BT et HTA
- b) pylône pour ligne HTB à 2 circuits
- c) pylône muguet (en tôle pliée) pour ligne HTB à 2 circuits

Dans les zones fortement givrées, les contacts entre phases sont plus fréquents (charges de givre différentes sur les conducteurs, décharge de givre). Une solution, lorsque l'on ne peut éviter ce type d'armement, est l'emploi d'espaceurs isolés entre phases, ces techniques sont de plus en plus utilisées en 63 et 90 kV. Ces espaceurs, placés en milieu de portée, sont du même type qu'un isolateur composite. Leur légèreté est un atout supplémentaire.

A19.6.3.3. Armement en nappe

Il est d'usage fréquent pour les lignes HTA et HTB (figure A19.6.5a). Le pylône du type chat, très utilisé en France pour les lignes HTB, peut être considéré comme armé en nappe, bien que la poutre centrale soit légèrement plus haute que les consoles (figure A19.6.5b).

Cet armement en nappe exige des supports plus larges mais moins élevés que pour les autres armements et donne une plus grande sécurité en cas de décharge de givre ou d'oscillations verticales des conducteurs. Il permet, par l'installation de deux câbles de garde, de protéger la ligne contre les coups de foudre et est bien adapté aux lignes de montagne.

Les figures A19.6-5a,b et c illustrent quelques exemples d'armements en nappe et nappe-voûte

Fig. A19.6-5a

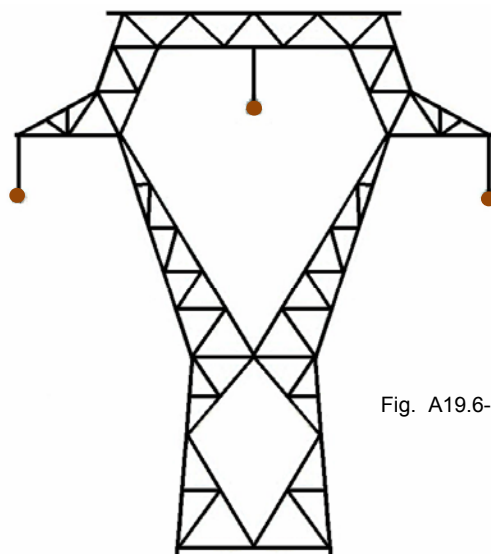
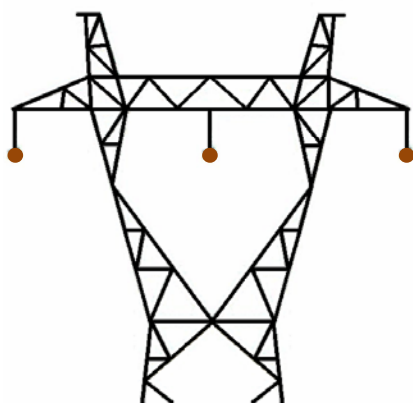


Fig. A19.6-5b

- a pylône pour ligne HTA et HTB
- b pylône chat, nappe-voûte pour ligne HTB

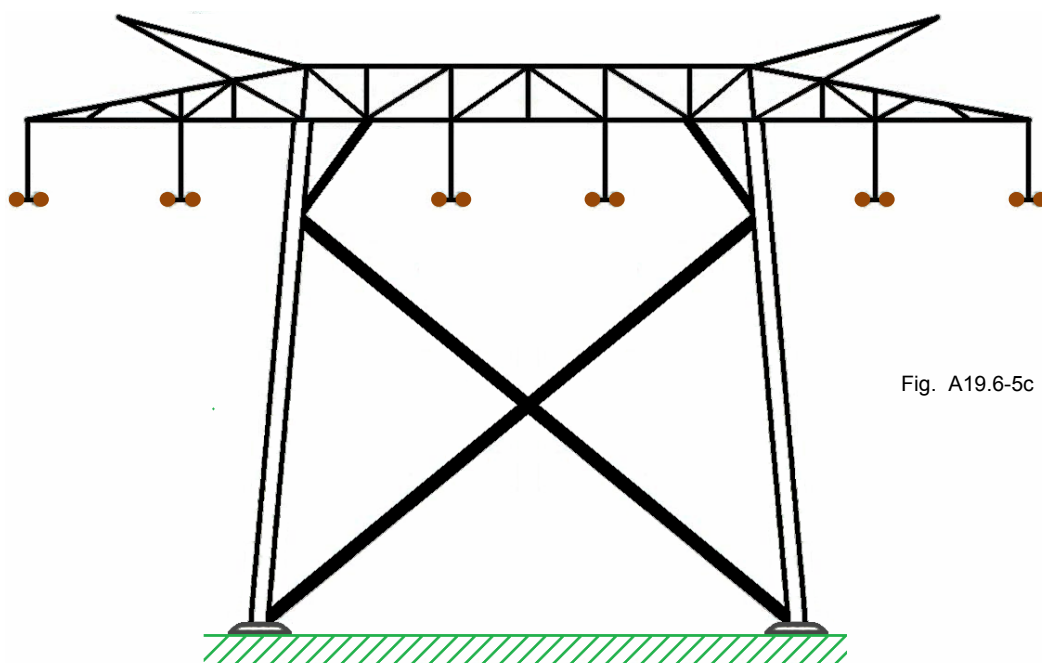


Fig. A19.6-5c

- c pylône type Trianon

Il faut signaler ici l'armement dit nappe-voûte normalisé pour lignes BT et HTA sur poteaux (NF C 66-428). Cet armement, réalisé en cornières à ailes égales, a fait l'objet d'abaques d'utilisation insérées dans l'annexe de la norme NF C 11-201. La figure A19.6-6 en précise la forme et les dimensions ; un armement similaire à écartement de 1,70 m au lieu de 1,40 m est également normalisé et utilisé dans le cas des portées supérieures à environ 200 m.

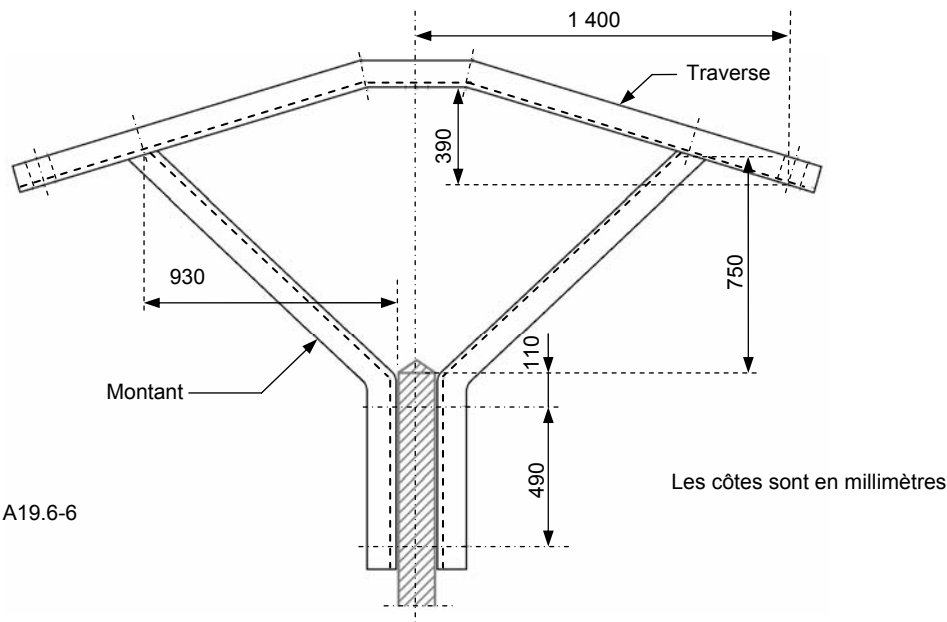


Fig. A19.6-6

De plus, l'armement nappe-voûte permet de reporter l'effort à 0,75 m au-dessus du sommet du poteau, et donc d'utiliser des supports de hauteur moindre que dans le cas des autres armements normalisés, l'effort disponible F étant toutefois diminué ($0,9 F$ au lieu de F).

A19.6.3.4. Largeur d'encombrement des supports

Cette largeur d'encombrement en fonction de la disposition des phases est donnée par le tableau ci-dessous à titre indicatif.

Largeur d'encombrement des supports en fonction de la disposition des phases				
Disposition des phases	HTA	HTB		
		1 circuit 225 kV	2 circuits 225 kV	2 circuits 400 kV
Verticale	-	-	9,60 m (5)	16,00 m (5)
Triangle	1,60 m (1)	8,70 m (3)	19,00 m (6)	32,00 m (6)
Horizontale	2,80 m (2)	10,50 m (4)	32,00 m (7)	52,00 m (7)

- (1) isolateurs rigides (figure A19.6-3b)
- (2) armement nappe-voûte (figure A19.6-6)
- (3) armement en quinconce (figure A19.6-3 a)
- (4) pylône chat (figure A19.6-5 b)
- (5) disposition en drapeau (figure A19.6-4c)
- (6) pylône type Beaubourg (figure A19.6-3d)
- (7) pylône type Trianon (pieds tubulaires) (figure A19.6-5c)

A19.6.4. Détermination d'une silhouette de support

A19.6.4.1 Généralités

La disposition des conducteurs (nappe, triangle, etc.) et le nombre de circuits étant fixés a priori, la silhouette du pylône est déterminée par sa hauteur et les distances entre conducteurs et masse et celles entre câbles.

Connaissant ces distances ainsi que la disposition des conducteurs, il est possible de déterminer l'espace libre à ménager autour de chaque conducteur. On trace alors une épure de balancement en dessinant la chaîne et son équipement dans les positions extrêmes correspondant aux diverses hypothèses, et en traçant les cercles de rayon égal à la distance à la masse (avec vent et sans vent), centrés sur le contour des pièces sous tension. L'enveloppe de ces cercles délimite l'espace à laisser libre (figure A19.6-7).

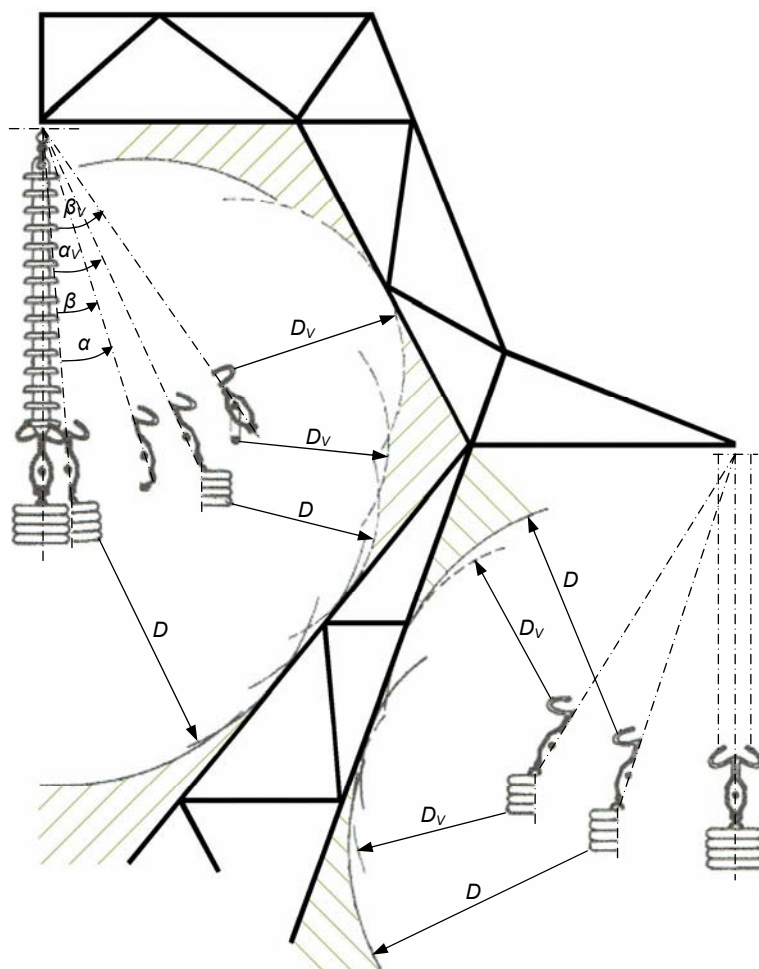


Fig. A19.6-7

Hypothèse De vent	Chaîne	Angle de balancement admissible	Distance minimale à la masse
sans vent	avec contrepoids avec bretelle antivibratoire	a b	D
avec vent	avec contrepoids avec bretelle antivibratoire	a_v b_v	D_v

On peut obtenir une meilleure compacité de la ligne :

- soit en fixant, au droit du support, le point d'accrochage des conducteurs, à l'aide de chaînes d'isolateurs en V ou d'isolateurs rigides;
- soit en utilisant des consoles isolantes, remplaçant la console métallique et la chaîne d'isolateurs.

A19.6.4.2 Fixation des conducteurs au droit des supports

Pour les pylônes équipés de chaînes d'isolateurs suspendus, la solution est l'utilisation de chaînes en V qui réduit principalement la dimension des fenêtres des pylônes.

L'utilisation des chaînes en V sur les phases extérieures n'a d'intérêt que pour limiter le balancement des conducteurs donc la largeur du couloir de ligne mais au détriment d'un léger allongement des consoles. La configuration de compromis I-V-I illustrée par la figure A19.6-8 ci-dessous est souvent utilisée ; le seul problème qui risque de se poser pour cette solution est un balancement asynchrone, sous l'effet de rafale de vent, des phases extérieures et de la phase médiane pouvant entraîner des amorçages entre phases.

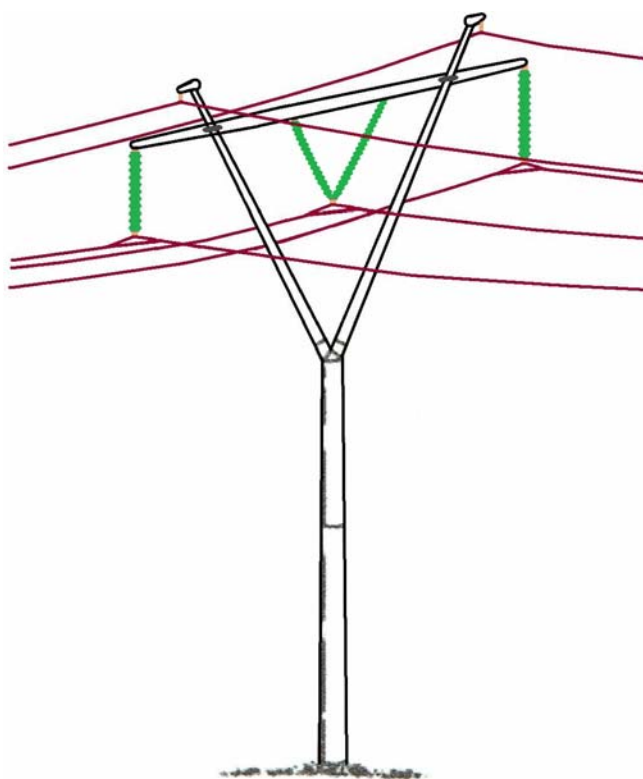


Fig. A19.6-8

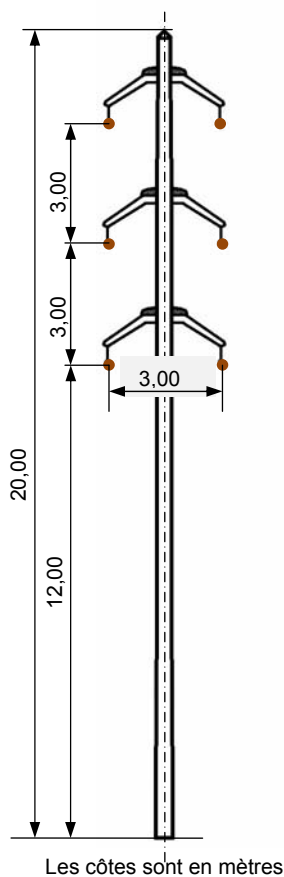
A19.6.4.3 Utilisation de consoles isolantes

Les consoles isolantes peuvent aussi être constituées par des isolateurs à long fût réalisés en céramique ou en matériaux synthétiques. Ces isolateurs peuvent être fixés sur le support soit :

- rigidement.
Dans ce cas, ils travaillent principalement en flexion et ne sont susceptibles d'équiper que des lignes dont la tension ne dépasse pas une centaine de kilovolts. La faible déformation possible dans le sens de la ligne peut être améliorée par l'utilisation de supports monopodes déformables, en bois principalement. Cette technique est fréquemment utilisée en Amérique du Nord.
- par un système articulé dans le sens de la ligne.
Dans ce cas, ce dispositif tolère une certaine déformation dans plusieurs axes de contraintes. Cette technique est utilisée par RTE pour la réalisation de la ligne LIERE (Ligne à Encombrement REduit).

La figure A19.6-9 de la page suivante en présente le principe.

Pylône pour une ligne LIERE HTB (90 kV)



A19.6-9a Pylône

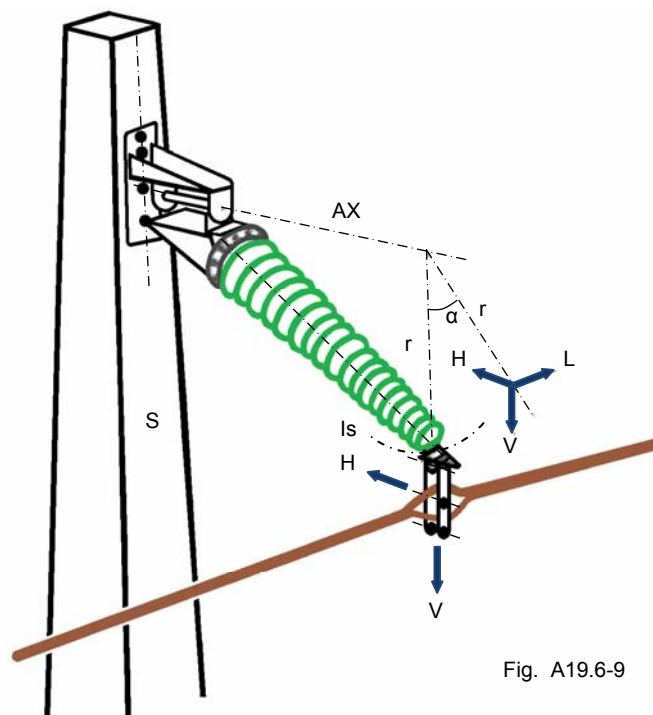


Fig. A19.6-9

AX axe horizontal
Is isolateur rigide
S support

H, L, V efforts respectivement transversal, longitudinal, vertical
(position d'équilibre stable : $\tan \alpha = L/V$)

A19.6-9b Principe de la composante isolante

A19.6.5. Les supports composés

L'utilisation de supports composés permet de réaliser, à l'aide de poteaux normalisés de petits efforts, des supports d'efforts importants nécessaires aux angles et aux arrêts, surtout dans le cas de conducteurs d'assez forte section pour les lignes HTA principalement.

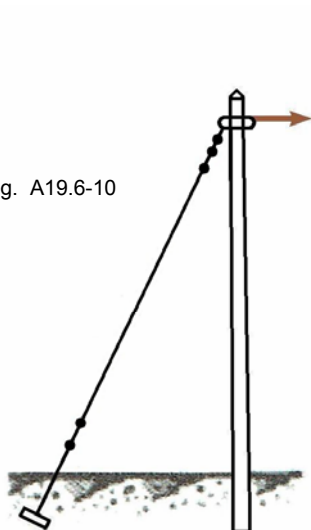
Dans ce document, on se limitera à présenter les supports le plus couramment utilisés (voir page suivante la figure A19.6-10) :

- les **supports haubanés**, en bois (NF C 11-201) ou en béton ;
- les **supports jumelés**, en bois (NF C 11-201) ou en béton ; dans le cas du béton, le jumelage se fait par accollement sur la grande face, ce qui permet de réaliser un support d'effort en tête, double de celui de chaque poteau composant ; des jumelages sur la petite face ne sont pas à conseiller car, si l'effort disponible est supérieur à deux fois l'effort disponible d'un seul poteau, la solidarisation des deux poteaux est difficile à réaliser ;
- les **supports contrefichés** : en bois (NF C 11-201) ;
- les **supports** dits **chevrons** (ou en V inversé), en béton précontraint ; en effet, dans de tels supports, un des poteaux est tendu en permanence et l'emploi des poteaux en béton armé traditionnel risquerait de provoquer des fissures permanentes sur le béton du poteau tendu ; un support d'effort en tête de 2 000 daN peut être obtenu à l'aide de deux poteaux de 300 daN d'effort nominal ; par contre, ce type de supports impose une ferrure de liaison des poteaux à leur sommet assez compliquée ; leur levage est également délicat ;
- les **portiques**, en bois ou en béton.

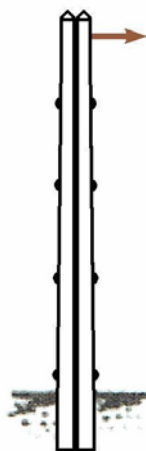
L'utilisation de **portiques** en bois **croisillonnés** avec disposition des conducteurs en nappe est à conseiller dans les régions soumises à des dépôts de givre importants.

Exemples de supports composés utilisés fréquemment

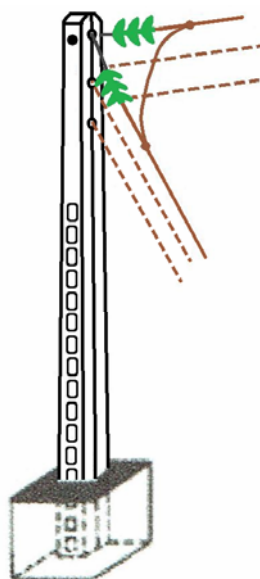
Fig. A19.6-10



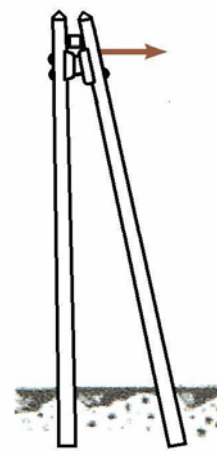
haubané
(en bois ou béton)



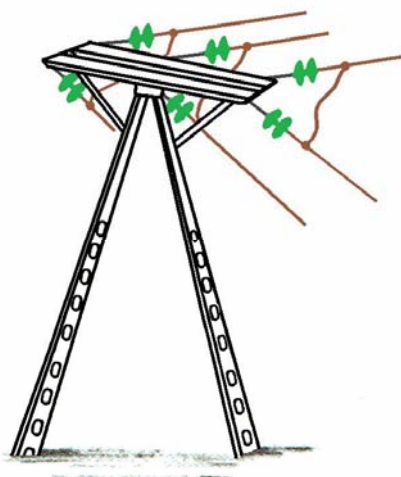
jumelé
(en bois)



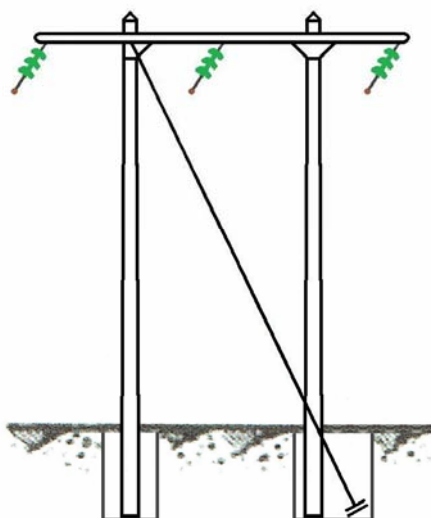
jumelé
(en béton)



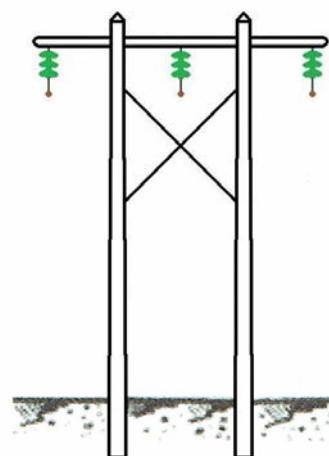
contrefiché
(en bois)



chevron ou V inversé
(en béton précontraint)



portique
(en bois ou en béton)



portique croisilloné
(en bois)

A19.6.6. Evolution vers les supports environnementaux

Le développement de supports esthétiques contribue à l'insertion des lignes de transport de l'électricité dans le paysage.

La prise en compte de l'impact environnemental dans la conception des supports n'est pas nouvelle. D'une manière générale, le support esthétique est un juste compromis entre les besoins techniques et industriels d'une part et les attentes du public pour une meilleure intégration dans le paysage d'autre part.

Dans les années 1920, le pylône en treillis de cornières a accompagné le développement du réseau de transport d'électricité. La silhouette des pylônes en treillis de cornières a été voulue, dès les premières conceptions, harmonieuse et équilibrée.

Ainsi, les pylônes **Chat** (figure A19.6-11) ont été préférés aux armements **Triangle** (figure A19.6-3a) ou **double-drapeau** (figure A19.6-4b), jugés plus agressifs.

Fig. A19.6-11



Photo d'un pylône électrique Chat.

Dans les années 1950, l'utilisation de structures tubulaires ouvre de nouvelles possibilités. Le premier pylône dit « esthétique » fut le pylône Apollone en treillis de tubes. Il reçut le label Beauté-France 1957 d'esthétique industrielle.

Le pylône **Trianon** (figure A19.6-12), portique à pieds droits tubulaires haubanés, étendit la technologie tubulaire et permit de construire des lignes plus basses. De géométrie très simple, a été largement employé à la demande des services chargés de la protection des sites ou de zones sensibles. Pour améliorer l'absorption dans les paysages, une série de pylônes tubulaires surbaissés est mise au point à partir du début des années 1960. C'est une famille de supports en forme de chevalet en tubes d'acier haubanés, offrant une silhouette très aérée se fondant dans le paysage.

Fig. A19.6-12



Photo d'un pylône électrique Trianon.

- Le pylône Trianon mesure 25 mètres et fait 12 tonnes en 220 kV.
- Le pylône Trianon mesure 35 mètres et fait 21 tonnes en 400 kV.

Parallèlement à ces évolutions, certains pylônes ont été redessinés pour accompagner le développement des lignes électriques haute et très haute tension liées au programme nucléaire. C'est ainsi qu'est née la silhouette élancée du pylône **Beaubourg** (figure A19.6-13).

Le pylône français Beaubourg est le résultat d'une recherche de cinq années et d'une consultation nationale menée par EDF. Il porte le nom du Centre national d'art et de culture Georges-Pompidou, dit Beaubourg où le jury l'a retenu en 1977 parmi une quinzaine de projets. Depuis, à chaque nouvelle ligne ou à chaque modernisation de ligne, il s'inscrit dans le paysage comme le symbole du réseau de transport d'électricité. Il est très fréquent sur le réseau 400 kV.

Fig. A19.6-13



Photo d'un pylône électrique Beaubourg.

À partir de 1970, des recherches sont menées avec des designers pour rechercher des formes nouvelles s'intégrant mieux dans les paysages. Dès cette année 1970, les premiers monopodes **Muguet**, en tôle pliée et soudée (figure A19.6-14), sont construits en France à partir d'un modèle répandu aux États-Unis.

C'est un pylône d'une structure épurée. Après cinq ans d'études, d'essais et quelques installations ponctuelles, en 1977 ils sont utilisés sur une ligne de 225 kV et en 1983 sur une ligne de 400 kV.

L'élégance de ces supports, composés d'éléments pleins, a retenu toute l'attention des esthéticiens industriels consultés sur le sujet de l'esthétique des pylônes et l'insertion des lignes dans les paysages.

Fig. A19.6-14



Photo du pylône électrique Muguet.

- Le pylône Muguet mesure 42 mètres et fait 15 tonnes en 220 kV.
- Le pylône Muguet mesure 54 mètres et fait 33 tonnes en 400 kV.

Dans les années 1995 sont apparus des pylônes architecturaux qui s'inscrivent dans une démarche d'esthétique industrielle :

- faisant suite à un concours international pour l'insertion de supports sur des lignes électriques 400 kV, les pylônes **Roseau** (figure A19.6-15) développé par l'architecte Marc MIMRAM (RTE) et **Fougère** (figure A19.6-16) développé par l'équipe RITCHIE/RFR/ GUSTAFSON (RTE) ont été retenus pour la créativité de leurs architectes, tant sur le plan des formes, des couleurs que des technologies utilisées ;



Fig. A19.6-15

Photo du pylône électrique Roseau.

- 11 exemplaires sur le réseau 400kV installés depuis 2004



Fig. A19.6-16

Photo du pylône électrique Fougère ou Ritchie.

- Deux exemplaires installés sur le réseau 400 V en 2002
- dans cette nouvelle génération de pylônes, le bois - matériau noble - associé à la robustesse de la technique du lamellé collé, fait aussi son apparition pour les lignes à haute tension 90 kV avec les pylônes **Grand Duc** développé par l'architecte Fabienne POULAT (RTE) (voir figure A19.6-17 page suivante) et **Corolle** développé par l'architecte Martin SZREKELLY et la société TRANSEL (RTE) (voir figure A19.6-18 page suivante).

Ces nouveaux pylônes promettent d'offrir une solution alternative face aux difficultés d'insertion des ouvrages HTB dans l'environnement. Toutefois, compte tenu du coût relativement onéreux de ces solutions (de 7 à 10 fois plus élevé que les supports treillis équivalents), celles-ci ne seront utilisées que de façon exceptionnelle.

Fig. A19.6-17



Photo du pylône électrique Grand Duc

Fig. A19.6-18



Photo du pylône électrique Corolle

A19.6.7. Risques associés

Les pylônes sont généralement accessibles au public, en ville ou dans la campagne. Il faut rappeler que leur accès et leur ascension est interdit aux personnes non habilitées, pour des raisons évidentes de sécurité : risque de chute et de court-circuit (les câbles sont en métal nu, non recouverts d'isolant).

De plus, en cas de court-circuit (dus à la foudre principalement, mais aussi au vent fort, à la végétation non élaguée, à la pollution industrielle ou saline, parfois aux oiseaux...) tout un périmètre autour du pylône est soumis temporairement à une forte surtension, pouvant atteindre plusieurs milliers de volts. Ces surtensions entraînent des risques pour les biens et les personnes situées dans cette zone :

- détérioration des équipements électriques et électroménagers domestiques ;
- électrisation des hommes et des animaux à proximité,
- explosion des canalisations et cuves d'hydrocarbures et de gaz.

Ces cas sont généralement détectés dès la construction, soit de la ligne électrique, soit lors de l'instruction du permis de construire des bâtiments tiers, lorsqu'elle est faite correctement. Le risque est alors supprimé en mettant une distance suffisante entre les deux ouvrages.