

Présentation générale du réseau électrique :

Architecture et organisation

1. Organisation traditionnelle du secteur électrique

Un secteur où la concurrence génère « naturellement » le monopole. Dès le début de son histoire, l'industrie électrique a dû s'efforcer de répondre à de redoutables défis. À côté de qualités évidentes, l'électricité présentait, en effet, le double défaut de n'être pas commodément stockable et, obéissant aux lois complexes de l'électrotechnique, d'être difficile et coûteuse à transporter sur longue distance.

Savoir fournir à une clientèle de plus en plus exigeante l'énergie électrique économique et sûre, qu'elle réclamait sans cesse en plus grande quantité, n'allait donc pas de soi.

À vrai dire, les premières réponses apportées à ce défi furent loin d'être entièrement satisfaisantes : l'alimentation des agglomérations était généralement assurée par des petites centrales à vapeur produisant une électricité coûteuse et peu fiable. Les consommateurs industriels, quant à eux, ne pouvaient bénéficier de l'électricité abondante et bon marché produite par les usines hydrauliques qu'en s'implantant au plus près de ces ressources dans les vallées des massifs montagneux.

Fort heureusement, grâce à l'usage du courant alternatif et à l'élévation des tensions qu'il permit, le transport de l'électricité fit de grands progrès techniques et économiques. Au-delà de la possibilité d'utiliser des sources de production de plus en plus éloignées des centres de consommation, les électriciens découvrirent les vertus de l'interconnexion. En leur permettant de jouer sur la complémentarité des équipements hydrauliques et thermiques, l'interconnexion leur apportait des économies substantielles de combustibles. Elle leur permettait, aussi, grâce au « foisonnement » des aléas affectant aussi bien la demande que la production, d'améliorer la fiabilité de la desserte, de réduire les marges de sécurité nécessaires et d'accroître sans risque la taille des unités de production, ce qui procurait des économies importantes d'investissement et de charges d'exploitation. Avec les bienfaits de l'interconnexion, les électriciens venaient également de découvrir ce que les économistes appellent les phénomènes de « rendements croissants » pour les systèmes électriques : plus un système était puissant et fortement interconnecté, plus sa fiabilité et son économie s'affirmaient.

Dans le même temps, les industriels les plus avisés du secteur comprirent bien qu'ils renforceraient encore, à tout point de vue, leur situation, s'ils réussissaient à compléter leurs activités de production et de transport par des activités de distribution, activités relevant d'une logique de monopole naturel s'exerçant en général dans le cadre de concessions négociées avec les collectivités territoriales.

Dans ces conditions, le simple jeu des mécanismes de marché devait donc inévitablement pousser, si l'on n'y mettait pas un frein, à une concentration des activités de production, transport et distribution de l'énergie électrique entre les mains de puissants monopoles régionaux, voire nationaux, intégrés verticalement.

2. Réseaux et postes

Les sources de production d'énergie électrique, particulièrement les centrales nucléaires ou hydrauliques, sont généralement éloignées des centres de consommation, c'est-à-dire des centres industriels et des villes. L'énergie est acheminée à distance par des liaisons électriques à grand flux qui remplissent une fonction de transport d'énergie. Afin de garantir la sécurité d'alimentation, il est utile de pouvoir faire transiter l'énergie électrique par des voies différentes, pour pallier l'avarie

éventuelle de l'une d'elles. En outre, une exploitation économique veut que l'on utilise en priorité les unités de production au coût de revient le plus faible du fait de leur puissance, de leur âge ou de la nature du combustible. Ces deux considérations, technique et économique, conduisent à raccorder entre elles les liaisons électriques pour constituer des nœuds électriques qui permettent de mettre en commun toutes les sources de production et qui assurent ainsi une fonction d'interconnexion entre régions et entre pays frontaliers.

Le souci de réduire le nombre et le volume des infrastructures d'équipement à construire, la volonté de limiter les pertes d'énergie imposent sur les grandes distances de transporter l'énergie électrique à des tensions élevées dites à très haute tension (THT). Il est donc nécessaire d'élever la tension à la sortie des groupes de production puis, après son transport, de l'abaisser par plusieurs transformations successives pour alimenter les réseaux de répartition, puis les réseaux de distribution.

Les fonctions mises en évidence précédemment sont réalisées grâce à des lignes aériennes, des lignes souterraines et des transformateurs de puissance qui forment des réseaux de différentes tensions *dont les nœuds et les points de transformation sont les postes*.

2.1 Structure des réseaux

Le réseau de transport assure les fonctions suivantes :

- **le grand transport**, c'est-à-dire la capacité à véhiculer l'énergie électrique depuis les sources de production vers les centres de consommation, sur des distances de plusieurs centaines de kilomètres ;
- **l'interconnexion**, c'est-à-dire la faculté de faire transiter l'énergie électrique par des voies différentes afin de pouvoir faire face à l'avarie de l'une d'elle. On admet d'ailleurs comme un principe de base que l'exploitation du réseau reste possible au niveau $N-1$, c'est-à-dire en cas de perte d'un ouvrage quel qu'il soit ;
- **la transformation**, c'est-à-dire la possibilité de passer d'un niveau de tension à un autre niveau de tension permettant progressivement d'abaisser la tension pour alimenter le client final ;
- **la répartition**, c'est-à-dire la capacité d'alimenter les postes sources du réseau de distribution à 15 ou 20 kV.

Les fonctions de grand transport et d'interconnexion sont généralement assurés par les niveaux de tension les plus élevés (400 kV et 225 kV). La fonction de répartition est assurée par les niveaux de tension intermédiaire (225, 90 et 63 kV en France).

La fonction de transformation se réalise à tous les niveaux de tension puisque l'on passe, par une cascade régulière, du niveau de tension le plus élevé vers le niveau de tension le plus bas.

2.2 Topologie des réseaux

Les réseaux de transport d'énergie et d'interconnexion sont donc, par nature, constitués d'ouvrages capables de forts transits et maillés. Les liaisons forment des boucles dont la grande majorité a des côtés communs, réalisant ainsi une structure semblable aux mailles d'un filet (figure 1a).

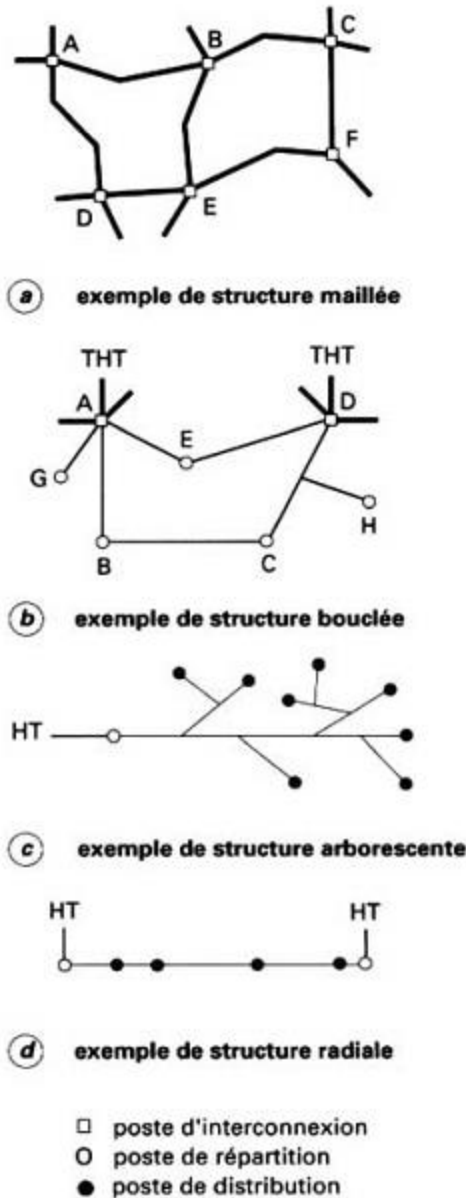


Figure 1. Topologie des réseaux électriques

Les réseaux de répartition qu'ils alimentent ont fréquemment une structure bouclée (figure 1b) et peuvent alors être exploités soit en boucle fermée, le réseau est dit bouclé, soit en boucle ouverte, le réseau est alors dit débouclé. Certaines alimentations se font aussi en antenne (figure 1b) ou encore en piquage en prélevant une partie de l'énergie circulant sur une ligne reliant deux postes (figure 1b).

Ces réseaux de répartition à caractère régional fournissent l'énergie aux réseaux de distribution qui sont des réseaux à moyenne tension (MT) assurant l'alimentation d'un grand nombre d'utilisateurs soit directement, soit après transformation en basse tension (BT). Leur configuration et leur mode d'exploitation sont variables. On peut trouver, selon les pays, des réseaux maillés exploités débouclés, des réseaux à structure radiale (figure 1d), des réseaux à structure arborescente (figure 1c).

D'une façon générale, ce sont les caractéristiques des sources de production, les besoins des utilisateurs et l'expérience d'exploitation qui, ajoutés à des considérations économiques, conduisent à choisir la structure topologique des réseaux en s'efforçant de réduire l'incidence des défaillances dont ils peuvent être l'objet.

2.3 Imperfections des réseaux

Pour des raisons techniques et économiques, il n'est pas possible de construire des réseaux exempts de défauts de fonctionnement. Leurs éléments constitutifs sont conçus, construits et entretenus de façon à réaliser le meilleur compromis entre coût et risque de défaillance. Il en résulte que des défauts ou incidents peuvent venir perturber le bon fonctionnement des installations. Parmi les causes d'incidents susceptibles d'affecter les réseaux, citons les perturbations atmosphériques, qui peuvent induire des défauts d'isolement des parties sous tension (foudre) ou, dans les cas extrêmes, mettre en péril la tenue mécanique des ouvrages (vent, neige, givre).

Les courts-circuits qui s'ensuivent ont sur l'ensemble de la chaîne production-transport-consommation des effets néfastes, en particulier :

- des risques de perte de stabilité du réseau ;
- des contraintes thermiques et mécaniques sur le matériel ;
- une dégradation de la qualité de la fourniture ;
- des tensions induites perturbant les circuits de télécommunication.

Ils créent en outre des risques sur l'environnement des ouvrages, notamment des possibilités d'électrocution.

La structure topologique d'un réseau permet d'agir de plusieurs manières sur les contraintes subies par les ouvrages et sur la qualité de l'énergie délivrée, par exemple en fractionnant les réseaux, en assurant la possibilité de secours par des réseaux voisins ou en multipliant les sources d'alimentation.

Rappelons que les réseaux doivent, de surcroît, être équipés des systèmes de protection aussi sélectifs que possible, afin d'éliminer d'une manière sûre et dans les plus brefs délais, en cas de défaut, l'élément affecté et lui seul. C'est dans les postes qu'on trouve ces dispositifs. L'importance d'un réseau est d'autant plus grande, tant sur le plan de la sécurité que sur celui de l'économie, que son niveau de tension est élevé. En effet, toute défaillance entraîne des défauts d'alimentation sur des zones étendues. C'est pourquoi sont mises prioritairement en œuvre sur ces réseaux les mesures de nature à assurer la meilleure qualité de fonctionnement possible. Aussi, une importance particulière est-elle attachée à l'interconnexion de ces réseaux, de même que sont utilisés pour leur protection les technologies les plus évoluées.

Dans l'organisation d'un réseau, les postes sont les points névralgiques, puisque, du fait de leur fonction d'interconnexion et de transformation, la défaillance de l'un d'eux peut provoquer la mise hors service de nombreuses lignes et compromettre les liaisons entre réseaux de tensions différentes.

2.4. Postes

Les fonctions du réseau de transport définies précédemment sont réalisées grâce à des lignes aériennes, des lignes souterraines et des transformateurs de puissance qui forment un réseau maillé dont les nœuds sont les postes (figure 2.).

Ces postes réalisent les actions suivantes :

- l'aiguillage des lignes de même tension entre elles ;
- l'évacuation de l'énergie des sources de production vers le réseau ;
- la liaison entre des réseaux de tensions différentes.

À cet effet, les postes constituent, pour chaque échelon de tension, un point commun appelé jeu de barres omnibus et les actions précédentes sont assurées par l'appareillage à haute tension qui permet :

- de contrôler les grandeurs électriques (tension et courant) ;
- d'établir ou d'interrompre le passage du courant, grâce aux disjoncteurs ;
- d'assurer la continuité ou l'isolement d'un circuit, grâce aux sectionneurs ;
- de modifier la tension de l'énergie électrique, grâce aux transformateurs de puissance.

Les postes sont donc des points névralgiques dans l'organisation du réseau puisque la défaillance d'une unité peut provoquer la mise hors service de nombreuses lignes qui deviennent inutilisables.



Figure 2.a. Vue générale d'un poste aérien.



Figure 2.b. Équipements électriques d'un poste aérien.

Le schéma le plus général d'un poste comprend donc les éléments suivants (figure 3):

- les jeux de barres qui assurent la matérialité du nœud électrique ;
- les disjoncteurs qui jouent un rôle de coupure et de protection des ouvrages ;
- les sectionneurs qui ont un rôle d'isolement ou d'aiguillage ;

- les transformateurs de mesure qui sont destinés à l'alimentation des appareils de mesure nécessaires à la conduite du réseau, à l'alimentation des protections et des automatismes de reprise du service ;
- les transformateurs de puissance lorsque l'ouvrage est un poste de transformation.

Un poste est un ouvrage extrêmement important, dans le réseau, que l'on ne peut pas se permettre de mettre hors service dans sa totalité. Cependant, pour des raisons d'entretien. On peut être amené à intervenir dans les postes. C'est pourquoi on installe, dans la plupart des postes du réseau de transport, au moins deux jeux de barres. Par ailleurs on réalise, au moyen de disjoncteurs qui découpent ces jeux de barres, plusieurs sommets électriques, un sommet électrique apparaissant comme une portion de jeu de barres encadrée par deux disjoncteurs. Ces sommets peuvent alors fonctionner en parallèle, les disjoncteurs étant fermés, ou de façon séparée, les disjoncteurs étant ouverts. Le fonctionnement en parallèle correspond à une volonté de réaliser un réseau maillé mais le fonctionnement à sommets séparés permet de limiter le niveau du courant de court-circuit sur une partie du réseau.

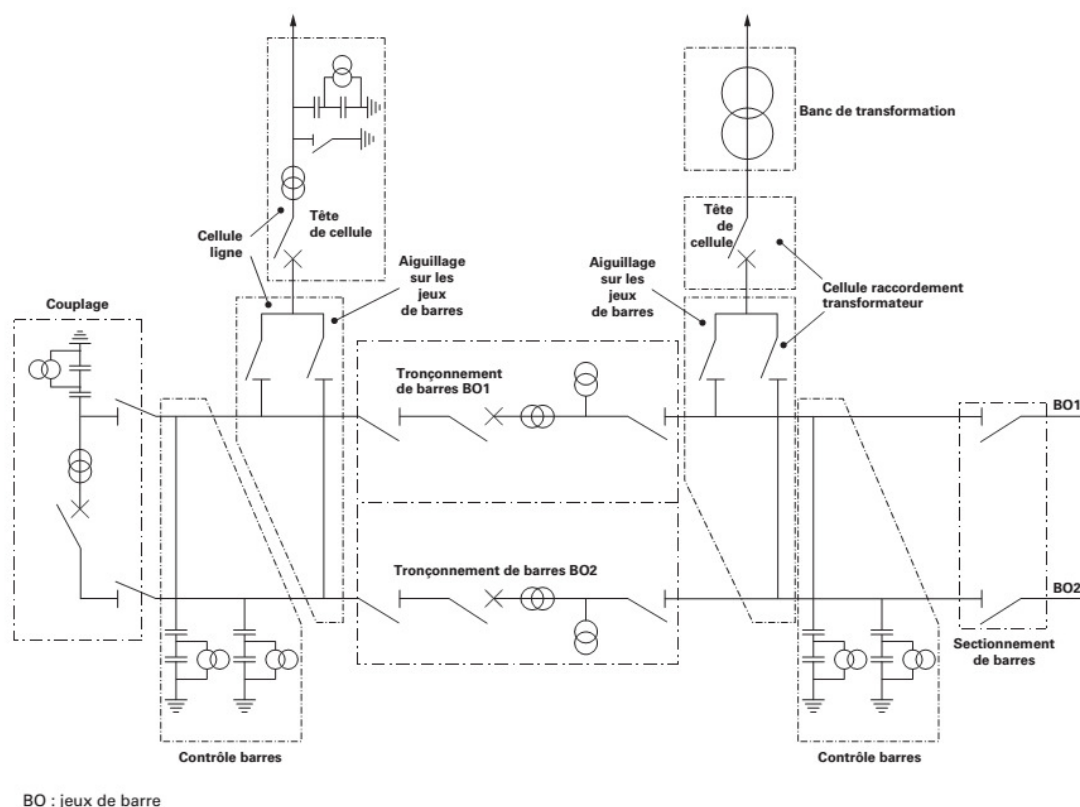


Figure 3. Éléments constitutifs d'un poste.

2.4.1 Éléments constitutifs d'un poste

La figure 2 donne un schéma de poste.

■ Jeux de barres

Un jeu de barres est un ouvrage électrique triphasé régnant sur la longueur du poste. Il permet de relier entre eux les départs de même tension qui y aboutissent. Un poste électrique peut être doté de un, deux, voire trois jeux de barres pour une tension donnée.

■ *Cellules de couplage des barres*

Elles permettent (figure 4.c) de relier entre eux deux jeux de barres quelconques du poste ou deux de leurs sections ou tronçons, disposés du même côté d'un sectionnement ou d'un tronçonnement de barres s'il en existe un.

Leur équipement comprend un disjoncteur, les sectionneurs d'aiguillage sur les différents jeux de barres et des réducteurs de mesures. Comme appareillage, que les sectionneurs qui permettent d'effectuer les manœuvres de raccordement désirées.

■ *Sections de barres – Tronçons de barres*

Lorsqu'un jeu de barres peut être partagé en plusieurs parties par sectionneurs ou par disjoncteurs, on appelle (figures 4.a et 4.b):

- « section de barres » une partie d'un jeu de barres comprise entre deux sectionneurs de sectionnement, entre un sectionneur de sectionnement et une extrémité de barres, ou entre un sectionneur de sectionnement et un disjoncteur ou interrupteur de tronçonnement ;
- « tronçon de barres » une partie d'un jeu de barres comprise entre deux disjoncteurs de tronçonnement, ou entre un disjoncteur de tronçonnement et une extrémité de barres.

Le tronçonnement permet de réaliser autant de sommets d'exploitation qu'il y a de tronçons de jeux de barres délimités par des disjoncteurs.

Les sectionnements se composent uniquement d'un sectionneur et permettent d'obtenir autant de sommets qu'il y a de sections.

■ *Cellules de ligne*

On distingue :

- la tête de cellule qui regroupe les équipements de contrôle, de protection, de coupure, d'isolement et de mise à la terre de la ligne : transformateurs de mesure courant et tension, disjoncteur, éventuel sectionneur d'isolement à coupure visible et de mise à la terre de la ligne
- La partie aiguillage qui permet de connecter la tête de cellule à l'un ou l'autre des jeux de barres du poste. Elle ne comporte, comme appareillage, que les sectionneurs qui permettent d'effectuer les manœuvres de raccordement désirées.

■ *Cellules de raccordement des transformateurs de puissance*

Elles diffèrent des cellules de lignes par la suppression :

- du sectionneur d'isolement du banc de transformation dont la fonction de « coupure visible » est assurée par les sectionneurs d'aiguillage encadrants proches ;
- et, le cas échéant, des transformateurs de mesure courant et tension qui ne sont installés, en l'absence de protection de débouclage ou de jeux de barres, que sur l'enroulement de plus faible tension du transformateur de puissance.

■ *Banc de transformation*

Il comprend, outre le transformateur ou l'autotransformateur de puissance et ses accessoires :

- l'appareillage annexe : parafoudres de phases, inductance de neutre, parafoudre de neutre, associé à des transformateurs de mesure de courant et tension, transformateur de protection de cuve, transformateur de point neutre ;

- les installations HTA raccordées à son enroulement tertiaire : transformateur de soutirage pour l'alimentation des aéroréfrigérants et, le cas échéant, des services auxiliaires du poste, ainsi qu'éventuellement, les équipements de compensation de l'énergie réactive ;
- les liaisons primaire et secondaire.

■ Liaison omnibus

Elle permet de relier deux quelconques tronçons de jeux de barres disposés de part et d'autre d'un tronçonnement de barres. Elle comporte un disjoncteur et les sectionneurs d'aiguillage sur tous les tronçons de jeux de barres déterminés par le tronçonnement correspondant, ainsi que les transformateurs de mesure nécessaires pour l'alimentation des protections.

Nous retiendrons donc que, par définition, les appareils de coupure, ainsi que l'appareillage de mesure et de protection propre à un départ, sont regroupés dans une cellule. Un poste comporte donc autant de cellules que de départs qui sont raccordés à ses jeux de barres. En outre, les jeux de barres sont susceptibles de constituer plusieurs nœuds électriques par l'ouverture de disjoncteurs ; on appelle alors sommet le jeu de barres ou le tronçon de jeu de barres ainsi constitué. Le nombre des sommets d'un poste caractérise ainsi son aptitude à former des nœuds électriques.

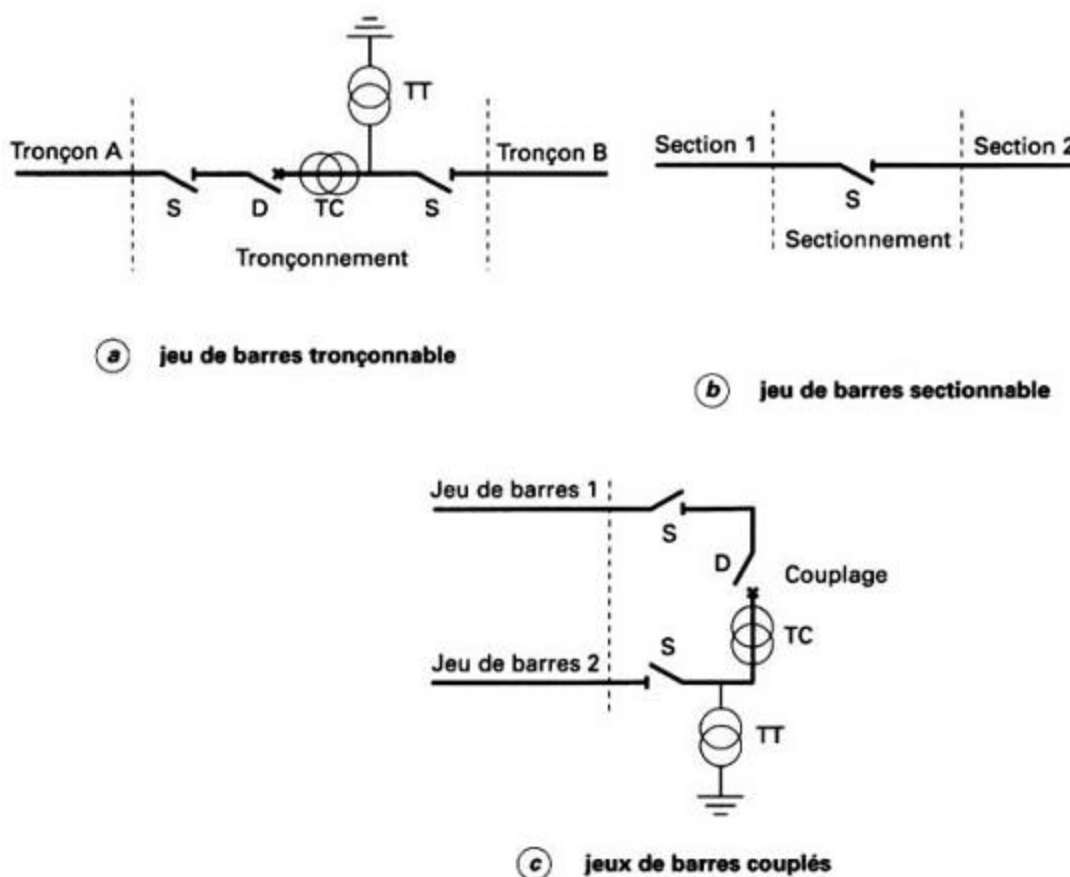


Figure 4. Éléments d'ouvrages d'un poste

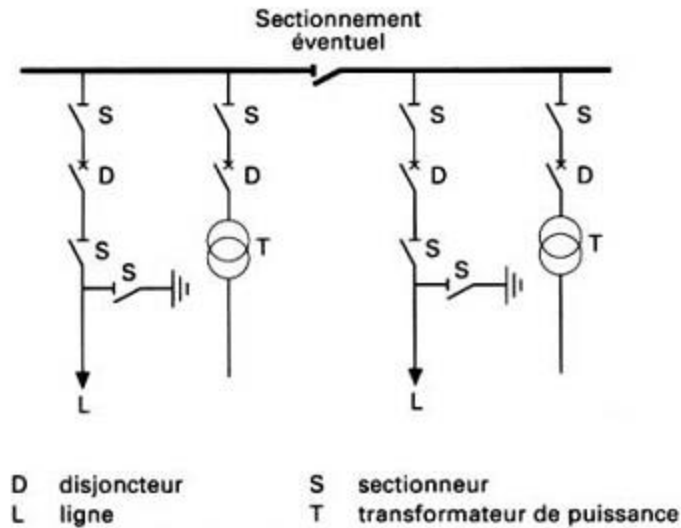


Figure 5. Schéma à un jeu de barres

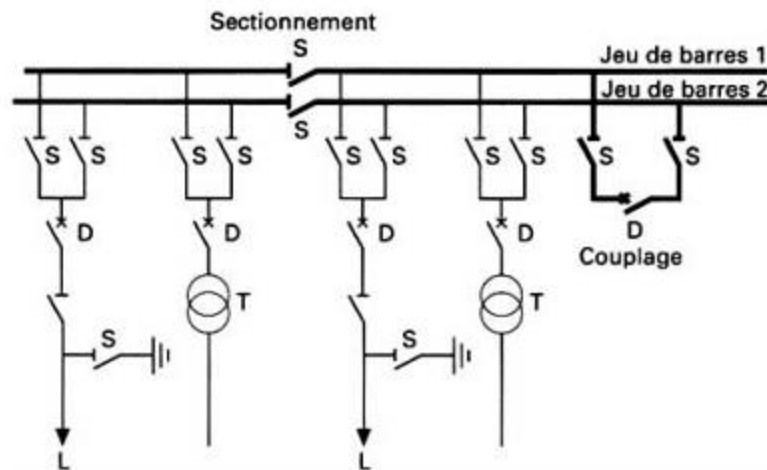


Figure 6. Schéma à deux jeux de barres

2.4.2 Différents types de postes

On distingue, suivant les fonctions qu'ils assurent, plusieurs types de postes :

— les postes à fonction d'interconnexion, qui comprennent à cet effet un ou plusieurs points communs triphasés appelés jeu de barres, sur lesquels différents départs (lignes, transformateurs, etc.) de même tension peuvent être aiguillés ;

— les postes de transformation, dans lesquels il existe au moins deux jeux de barres à des tensions différentes liés par un ou plusieurs transformateurs ;

— les postes mixtes, les plus fréquents, qui assurent une fonction dans le réseau d'interconnexion et qui comportent en outre un ou plusieurs étages de transformation.

Les actions élémentaires inhérentes aux fonctions à remplir sont réalisées par l'appareillage à haute et très haute tension installé dans le poste et qui permet :

— d'établir ou d'interrompre le passage du courant, grâce aux disjoncteurs;

— d'assurer la continuité ou l'isolement d'un circuit grâce aux sectionneurs;

— de modifier la tension de l'énergie électrique, grâce aux transformateurs de puissance.

Un ensemble de protections et d'automates contrôle les grandeurs électriques réduites, élaborées par des réducteurs de mesure (tension et courant principalement) et agit sur l'appareillage à haute

tension afin d'assurer les conditions d'exploitation pour lesquelles le réseau a été conçu. Nous retiendrons donc que, par définition, les appareils de coupure, ainsi que l'appareillage de mesure et de protection propre à un départ, sont regroupés dans une cellule.

Un poste comporte donc autant de cellules que de départs qui sont raccordés à ses jeux de barres. En outre, les jeux de barres sont susceptibles de constituer plusieurs nœuds électriques par l'ouverture de disjoncteurs ; on appelle alors sommet le jeu de barres ou le tronçon de jeu de barres ainsi constitué. Le nombre des sommets d'un poste caractérise ainsi son aptitude à former des nœuds électriques.

En outre, les jeux de barres sont susceptibles de constituer plusieurs nœuds électriques par l'ouverture de disjoncteurs ; on appelle alors sommet le jeu de barres ou le tronçon de jeu de barres ainsi constitué. Le nombre des sommets d'un poste caractérise ainsi son aptitude à former des nœuds électriques.

Les fonctions de transport et d'interconnexion sont assurées essentiellement par le réseau à 400 kV, parfois encore par le réseau à 225 kV. Des transformateurs alimentent, aux tensions de 225, 90 et 63 kV, des réseaux régionaux de répartition qui fournissent l'énergie aux réseaux de distribution à moyenne tension (20 kV, essentiellement).

Une classification fonctionnelle des postes, basée sur le rôle des ouvrages, peut être détaillée comme le précise la figure 7.

■ Postes d'interconnexion à 400 kV

— Poste O: poste à 400 kV assurant le regroupement des puissances appelées dans les postes A et F ; c'est généralement sur ces postes que sont raccordés les groupes générateurs de grande puissance.

■ Postes de transformation 400/225 kV

— Poste A: poste de transformation 400 /225 kV, qui assure également l'alimentation des postes B dont il constitue le regroupement des puissances appelées.

■ Postes d'alimentation régionale des réseaux de répartition

— Poste B: poste à 225 kV assurant le regroupement des puissances appelées dans les postes C, D et S ;

— Poste F: poste de soutirage sur le réseau à 400 kV et de transformation 400/90 kV ou 400/63 kV qui alimente des postes d ;

— Poste S: poste de transformation 225/90 kV ou 225/63 kV, qui assure l'alimentation des réseaux à 90 et 63 kV.

■ Postes d'alimentation des réseaux de distribution à moyenne tension (MT)

— Poste C: poste de transformation 225/20 kV ou 225/15 kV à puissance non garantie (antenne simple) ;

— Poste D: poste de transformation 225/20 kV ou 225/15 kV à puissance garantie (antenne double) ;

— Poste d: poste de transformation HT/MT.

À chaque type de poste ainsi défini correspond un schéma électrique et des dispositions constructives. Il est bien certain que l'ensemble des installations à réaliser dans le cadre d'un poste peut dépasser sensiblement celui défini dans la classification précédente. C'est ainsi que l'on peut trouver, dans une même enceinte, des postes de classifications différentes avec toutes les combinaisons nécessaires, compte tenu des conditions techniques et géographiques.

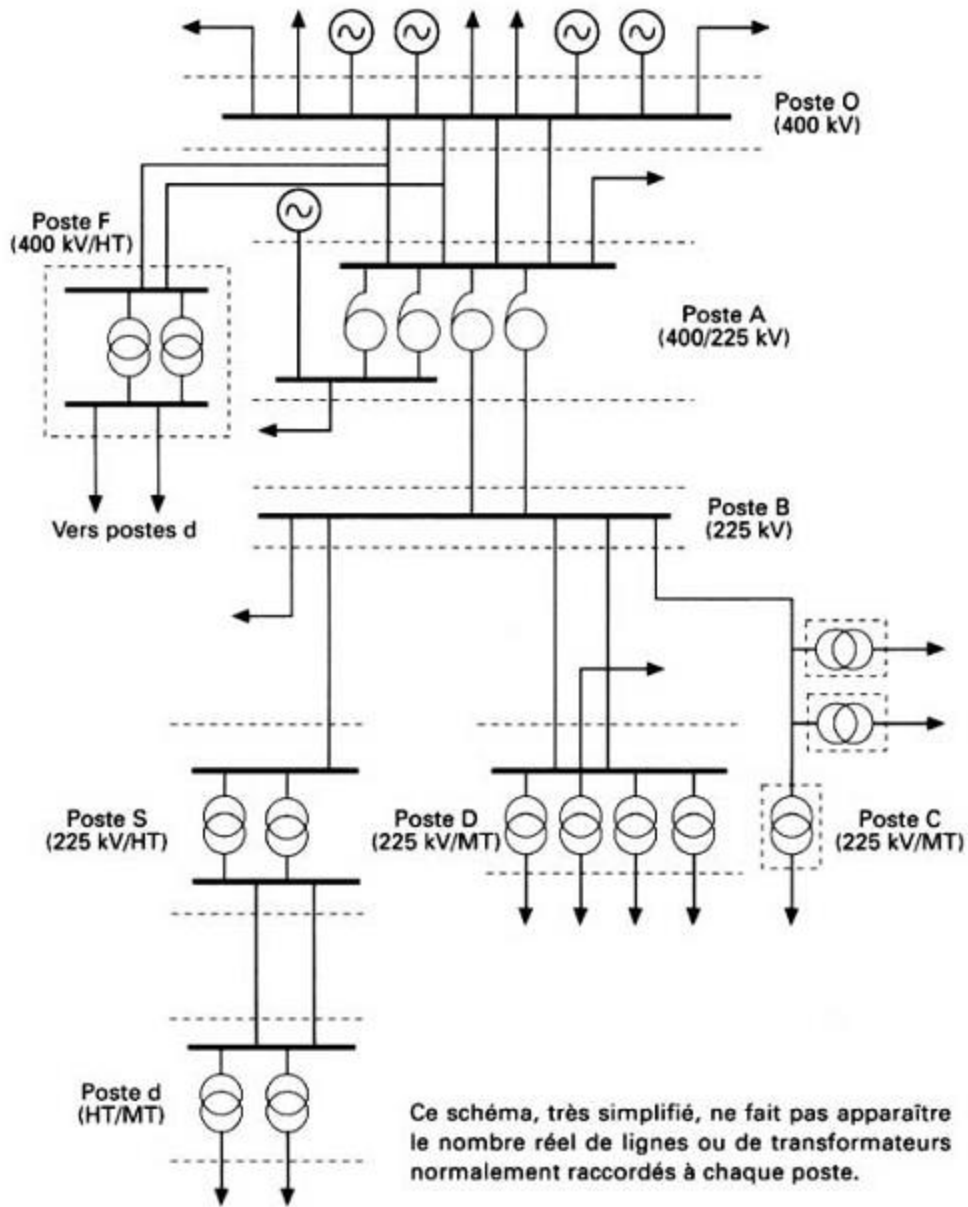


Figure 7. Architecture de principe des réseaux THT et HT.

3. Conduite des réseaux et mode d'exploitation des postes

Pour satisfaire à tout instant la demande dans les meilleures conditions de coût et de qualité de service, il est nécessaire que des centres de conduite reçoivent des informations en permanence des réseaux et des groupes de production, les traitent pour concevoir les actions à engager et émettent les ordres correspondants. À cette fin, au réseau de transit d'énergie se superpose un système de conduite constitué de liaisons de télécommunication qui relient les différents niveaux de contrôle et de commande aux postes.

La commande d'appareillages et d'automatismes depuis des sites déterminés permet ainsi d'adapter en permanence et de manière la plus optimale le schéma d'exploitation aux conditions de charge tout en assurant la sécurité des installations. La transmission, en retour de données, de mesures, de signalisations de position permet la connaissance de l'état du réseau et la surveillance du bon fonctionnement des appareils.

En fonction du type d'exploitation et de la plus-value apportée par l'intervention de l'homme, on distingue :

- les postes gardiennés, comportant du personnel d'exploitation présent durant les heures ouvrables et logé sur place ;
 - les postes télécommandés, exploités soit à partir d'un autre poste gardienné, soit à partir d'un bureau de conduite centralisé et qui n'ont donc pas de personnel sur place, sauf pour des interventions particulières ;
 - les postes téléalarmés, qui, dans le cas où la reprise automatique de service ne s'effectue pas, font parvenir une signalisation en un lieu où séjourne du personnel d'intervention.
- Ces derniers postes ne comportent généralement que des installations modestes nécessitant un nombre de manœuvres réduit, les postes importants étant, suivant les conditions locales, soit gardiennés, soit télécommandés.

4. Exigences générales du schéma électrique d'un poste

Au sein du réseau auquel il est raccordé, chaque type de poste a à remplir quelques fonctions bien déterminées dont dépend son schéma électrique, généralement représenté sous une forme unifilaire où chaque circuit triphasé est figuré par un trait unique.

Le choix d'un schéma électrique de poste est une tâche complexe demandant la prise en considération de nombreuses conditions techniques, historiques et économiques. Du fait de la variété des caractéristiques des réseaux et de la diversité des fonctions assignées aux postes, il n'est pas possible d'établir une liste exhaustive des conditions techniques à satisfaire. Il est cependant utile de définir les critères usuels de jugement des schémas de poste dont la combinaison pondérée permet au concepteur d'approcher la fonction recherchée. Notons que certains critères ont des conséquences opposées, d'où la nécessité de faire des priorités et de trouver des compromis.

4.1 Fonctionnement

Les critères de fonctionnement caractérisent l'aptitude du poste à remplir par sa structure et son système de protection, dans les circonstances les plus variées, les fonctions pour lesquelles il a été conçu. Cette exigence technique fondamentale peut être caractérisée par la sécurité et la sûreté de fonctionnement de l'ouvrage, desquelles découle la capacité du poste à éliminer les défauts en créant le minimum de perturbations annexes.

■ Sécurité

Un incident affectant le réseau peut induire un mode de fonctionnement dégradé et compromettre la continuité de l'approvisionnement en électricité. Les pertes d'efficacité subies par le réseau doivent être acceptables en regard de la nature de l'incident et de sa fréquence d'apparition. Par exemple, sur une ligne à deux circuits, on cherche, en cas de défaut sur un circuit, à maintenir en service le second circuit.

■ Sûreté

Le critère de sécurité n'a de sens que dans la mesure où la fiabilité des circuits à haute et très haute tension et celle du système de protection permettent d'assurer une sûreté de fonctionnement suffisante. Ainsi, l'élimination d'un défaut sur une ligne ou un transformateur doit se faire par l'ouverture d'un nombre réduit de disjoncteurs : en effet, la probabilité de défaillance d'un disjoncteur n'est pas nulle et le risque d'une mauvaise élimination croît donc avec le nombre de disjoncteurs à ouvrir. La recherche d'une sûreté élevée conduit généralement à des redondances de matériel importantes, aussi bien au niveau du schéma électrique du poste qu'à celui des systèmes de commande, de protection et d'automatisme. On s'aperçoit cependant que l'amélioration obtenue par la redondance peut être considérablement diminuée par des défaillances de cause commune, c'est-à-dire par les défaillances de plusieurs dispositifs (identiques ou différents, mais indépendants) dues à la même origine.

4.2 Exploitation

Il s'agit de concevoir le poste pour faciliter la conduite du réseau ; on distingue les éléments suivants.

■ *Souplesse d'exploitation*

Pour assurer la sécurité d'alimentation en faisant face, d'une part, aux aléas de production et de consommation et, d'autre part, aux indisponibilités d'éléments du réseau, l'exploitant est amené à constituer sur un même site plusieurs nœuds électriques. Pour ce faire, les jeux de barres sont découpés en plusieurs sommets auxquels sont connectés des lignes ou des transformateurs. Dans certains cas, ce découpage est rendu nécessaire pour limiter la puissance de court-circuit. La souplesse d'exploitation voudrait que tout départ, ligne ou transformateur, puisse être raccordé indépendamment avec tout autre départ. Cette exigence conduirait à installer dans un poste un nombre de sommets d'autant plus élevé que le nombre de combinaisons de liaisons raccordées est grand. Dans la pratique, le nombre de sommets est rarement supérieur à quatre.

■ *Manœuvres usuelles d'exploitation*

Les structures envisagées doivent permettre une exécution simple et rapide des manœuvres en régime normal d'exploitation (changement de sommets, mise hors service d'ouvrages, entretien, etc.) en limitant les incidences sur les ouvrages non intéressés par la manœuvre.

■ *Facilité de conception des manœuvres*

L'exploitation des postes étant encore soumise à des interventions humaines, le schéma électrique doit être facilement intelligible et se prêter à l'exécution commode d'interventions, tant au tableau de commande qu'au pied des appareils. Il faut observer que ce critère de clarté du schéma est subjectif et dépend éminemment des habitudes de conduite déjà acquises par les exploitants du réseau considéré.

4.3 *Évolution*

Un poste est généralement réalisé en plusieurs étapes successives, décalées dans le temps, et souvent tributaires de la construction d'autres ouvrages associés (arrivée de lignes aériennes, transformateur d'un autre poste, etc.).

L'aptitude à l'évolution d'un poste permet en particulier :

- de limiter, lors des premières étapes d'équipement, la construction d'ouvrages qui ne seront nécessaires que pour des étapes ultérieures ;
- de minimiser les temps de coupure et les modifications d'ouvrages existants pour la réalisation de nouvelles étapes ;
- de raccorder les lignes nouvelles dans de bonnes conditions et de pouvoir augmenter le nombre de sommets électriques lors de travaux d'extension.

4.4 *Coût*

L'examen du schéma électrique n'est pas suffisant pour évaluer précisément le coût d'un ouvrage, lequel dépend étroitement des dispositions constructives. Le coût peut cependant être approché grossièrement, à partir du schéma électrique, en comptabilisant le nombre d'appareils à haute et très haute tension qui seront nécessaires à son fonctionnement. En effet, ils entrent pour une part importante dans le coût global de l'ouvrage et l'augmentation de leur nombre complique les dispositions constructives, de sorte que le coût d'un poste varie globalement dans le même sens que le nombre d'appareils à haute et très haute tension qu'il contient.

5. Postes sous enveloppe métallique (PSEM), (Postes à haute et très haute tensions)

5.1. Émergence des postes SEM

Au début des années soixante, la croissance importante de la consommation d'électricité a conduit à reconsidérer la distribution de l'énergie électrique dans les grandes agglomérations. Ainsi, en Europe, la tension de 245 kV, qui jusqu'alors était utilisée exclusivement pour le transport, est devenue progressivement une tension pour l'alimentation directe des réseaux de distribution, dans les grandes agglomérations ou dans les zones proches de ces dernières. Cette réorganisation de la distribution de l'énergie a fait apparaître la nécessité de disposer d'appareillage à haute tension d'encombrement aussi faible que possible ; ce faible encombrement se justifie par le coût des terrains en zone urbaine et, indépendamment du coût, par la difficulté de trouver des surfaces suffisantes là où l'on en a précisément besoin. Il a été fait appel à une nouvelle technique d'appareillage appelée sous-enveloppe métallique (SEM). La particularité de ce type de poste réside dans le fait que les différents appareils (disjoncteurs, sectionneurs, jeux de barres, transformateurs de mesure, etc.), les liaisons entre ces appareils et les jeux de barres nécessaires à sa construction sont enfermés dans des enceintes métalliques étanches (enveloppes) mises à la terre (Figure 8).



Figure 8. Vue générale d'un PSEM

L'isolation est réalisée par un gaz sous pression qui assure à la fois l'isolement à la masse et l'isolement entre l'entrée et la sortie des appareils de coupure et d'interruption. De ce fait, on obtient une réduction très importante de l'encombrement. Le rapport de la surface au sol occupée par un poste ouvert à celle d'un poste SEM assurant les mêmes fonctions est d'environ 5 à 10 pour la partie appareillage seule. Cette réduction dépend de la tension et du mode de raccordement au réseau. Rapportée à un poste complet, la réduction est inférieure car elle dépend de la surface occupée par les autres composants (transformateurs, cellules moyenne tension, salles de relayage et de commande, atelier d'énergie...) et les dégagements et circulations nécessaires aux accès.

5.2. Paramètres de conception et de dimensionnement

Pour répondre aux contraintes diélectriques, électriques, thermiques et mécaniques auxquelles l'appareillage de poste est soumis en exploitation, le matériel SEM est principalement dimensionné par :

- la tenue aux tensions permanentes et temporaires ;
- la tenue au courant permanent et au courant de court-circuit (courant de courte durée) ;
- la tenue à la pression.

5.2.1 Tenue du gaz isolant aux tensions permanentes et temporaires

La tenue aux tensions permanentes et temporaires du réseau est assurée par un gaz isolant sous pression dont les caractéristiques vont conditionner les dimensions générales de l'appareillage.

5.2.1.1 Choix du gaz isolant

Eu égard à ses excellentes propriétés, dans le domaine de la coupure du courant et de l'isolation, le SF₆ est actuellement universellement utilisé comme gaz isolant. Les constructeurs d'appareillage ont fait appel à un gaz nouveau pour eux, mais bien connu des chimistes depuis 1890, date à laquelle Moissan et Lebeau ont réalisé la synthèse de l'hexafluorure de soufre (SF₆).

L'utilisation du SF₆ a été envisagée vers 1937, mais son industrialisation a commencé aux États-Unis seulement en 1948. Depuis cette date, le SF₆ a été de plus en plus utilisé dans les disjoncteurs pour remplacer l'huile ou l'air comprimé, qu'il a, depuis 1970, peu à peu éliminé, aussi bien en haute tension qu'en moyenne tension.

5.2.1.2 Choix de la pression

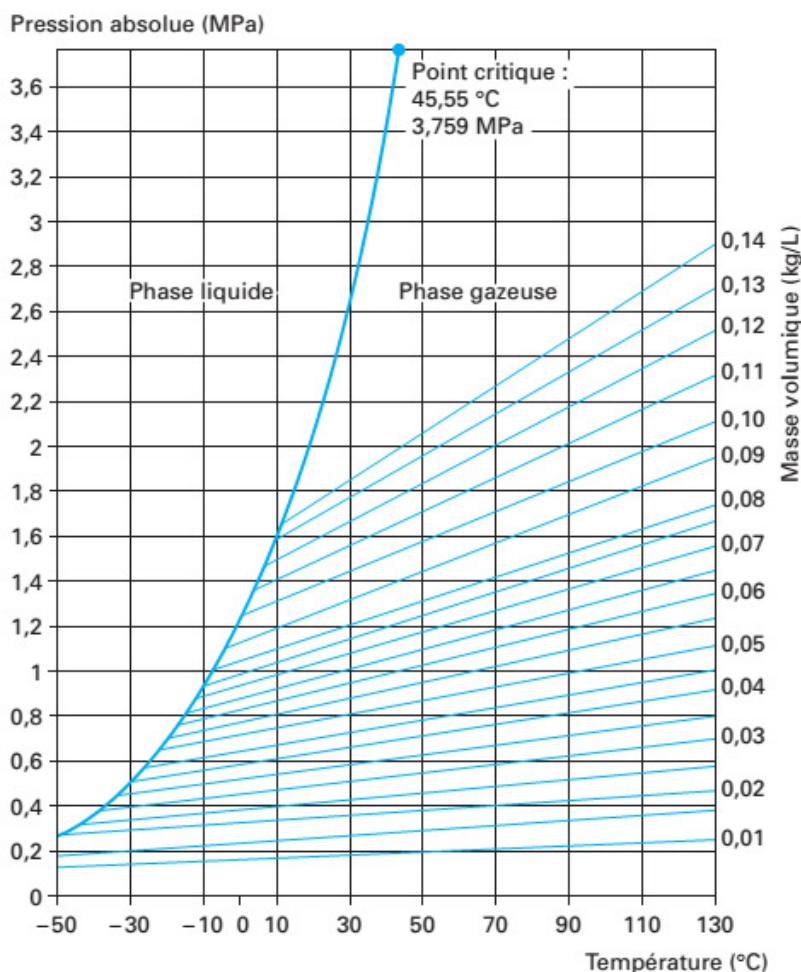


Figure 9. Pression absolue du SF₆ à, fonction de la température à densité constante.

La tension de claquage (tension disruptive) du SF₆ augmente avec sa pression. Pour réduire autant que possible les dimensions du matériel, la pression du SF₆ est la plus élevée possible. Cette pression est toutefois limitée par la pression de vapeur saturante à partir de laquelle le SF₆ passe à l'état liquide. La figure 8 montre la variation de la pression de liquéfaction en fonction de la température.

5.2.1.3 Problèmes liés au SF₆

- Surveillance de la pression

Compte tenu de l'importance que revêt le maintien de la pression du SF₆ sur les performances de l'appareillage, elle doit être surveillée en permanence pour détecter toute fuite. Comme pour tout gaz, cette pression varie avec la température ; aussi, la surveillance de pression doit-elle être corrigée avec la température. C'est donc en fait la masse volumique du gaz qui est surveillée.

■ Deux seuils de surveillance sont généralement retenus :

— le seuil d'alarme, situé à environ 10 % en dessous de la masse volumique de remplissage (pression assignée de remplissage à 20 °C) ; il permet d'alerter sur la présence d'une fuite et de procéder à un complément de remplissage ;

— le seuil minimal pour l'isolement, situé à environ 10 % en dessous du précédent ; il correspond à la limite au-dessous de laquelle les caractéristiques d'isolement et de coupure ne sont plus assurées. C'est ce dernier seuil qui dimensionne l'appareillage pour les performances assignées et auquel sont réalisés les essais de qualification.

■ Les dispositifs de surveillance doivent pouvoir être isolés des compartiments dont ils assurent la surveillance, afin de pouvoir vérifier périodiquement leurs seuils de fonctionnement sans vidanger, même partiellement, les compartiments. Ils doivent être facilement accessibles pour les opérations de contrôles périodiques ainsi que pour pouvoir être remplacés en cas de défectuosité.

5.2.2 Solutions technologiques

Compte tenu des paramètres et des contraintes indiquées dans les paragraphes précédents, les solutions techniques suivantes sont appliquées par les constructeurs pour la réalisation d'un appareillage SEM.

- Architecture générale d'un poste

■ Un poste SEM est constitué d'un assemblage de sous-ensembles qui comprennent :

— les appareils constitutifs de tout poste électrique (disjoncteurs, sectionneurs, sectionneurs de terre, transformateurs de mesure...) ;

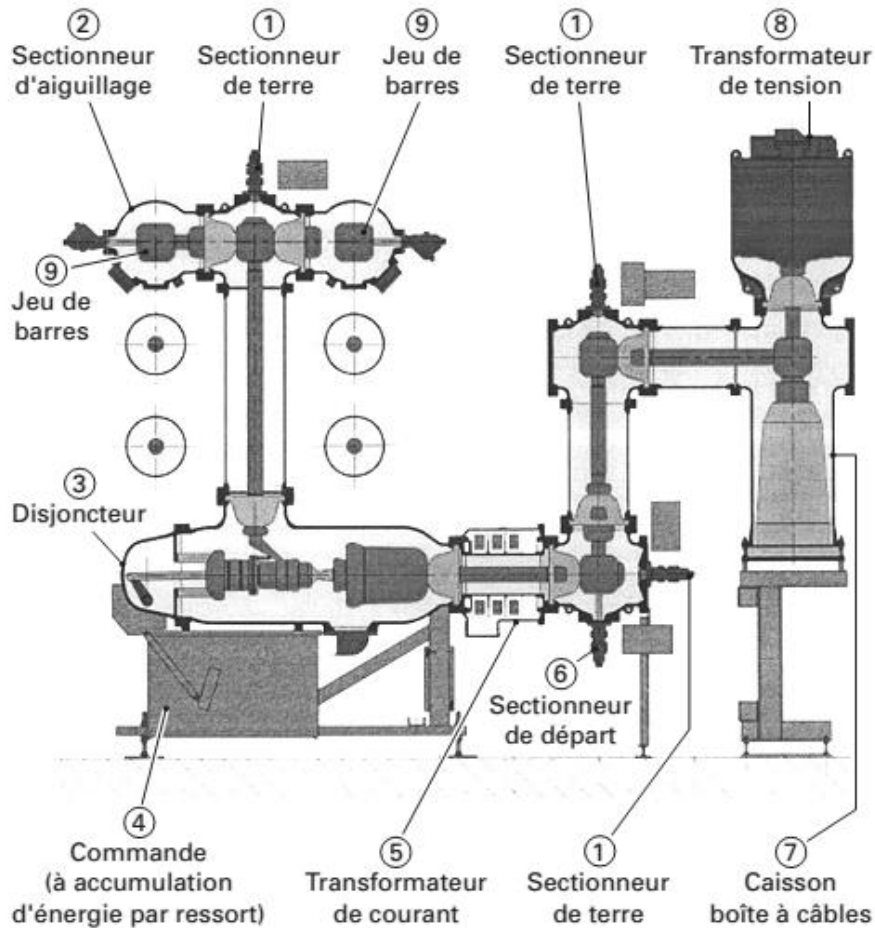
— les éléments de liaison entre ces appareils et les jeux de barres, principalement constitués d'éléments droits (virole comportant le conducteur et les supports isolateurs), dont la longueur est réalisée à la demande, et d'éléments de changement de direction et de dérivation (cuves en « L », en « T » ou en croix avec les connexions internes et les supports isolateurs) ;

— les éléments d'interface de raccordement aux câbles HT isolés, aux lignes aériennes et aux transformateurs.

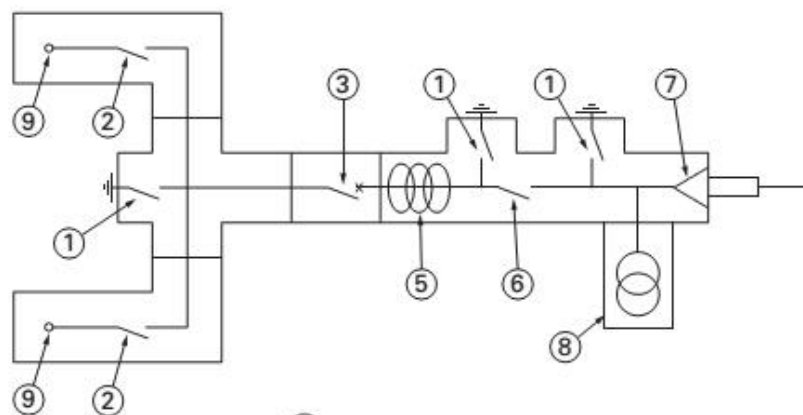
■ L'enceinte circonscrite par les enveloppes est divisée en compartiments indépendants séparés par des cloisons isolantes, appelées aussi supports isolateurs, car ils assurent également la fonction de support du conducteur. Des supports isolateurs intermédiaires sont aussi nécessaires pour maintenir les conducteurs dans un même compartiment ; ils laissent alors librement circuler le gaz.

■ Bien qu'historiquement monophasé, l'appareillage SEM tend vers une conception triphasée ou mixte (par exemple triphasé pour les jeux de barres et monophasé pour les disjoncteurs), en particulier pour les plus faibles niveaux de tension (jusqu'au 170 kV).

Les figures 10 et 11 montrent, à titre d'exemple, la vue en coupe d'un départ raccordé par câble d'un poste à deux jeux de barres en matériel SEM. La figure 10 correspond à un matériel monophasé et la figure 11 à un matériel triphasé.

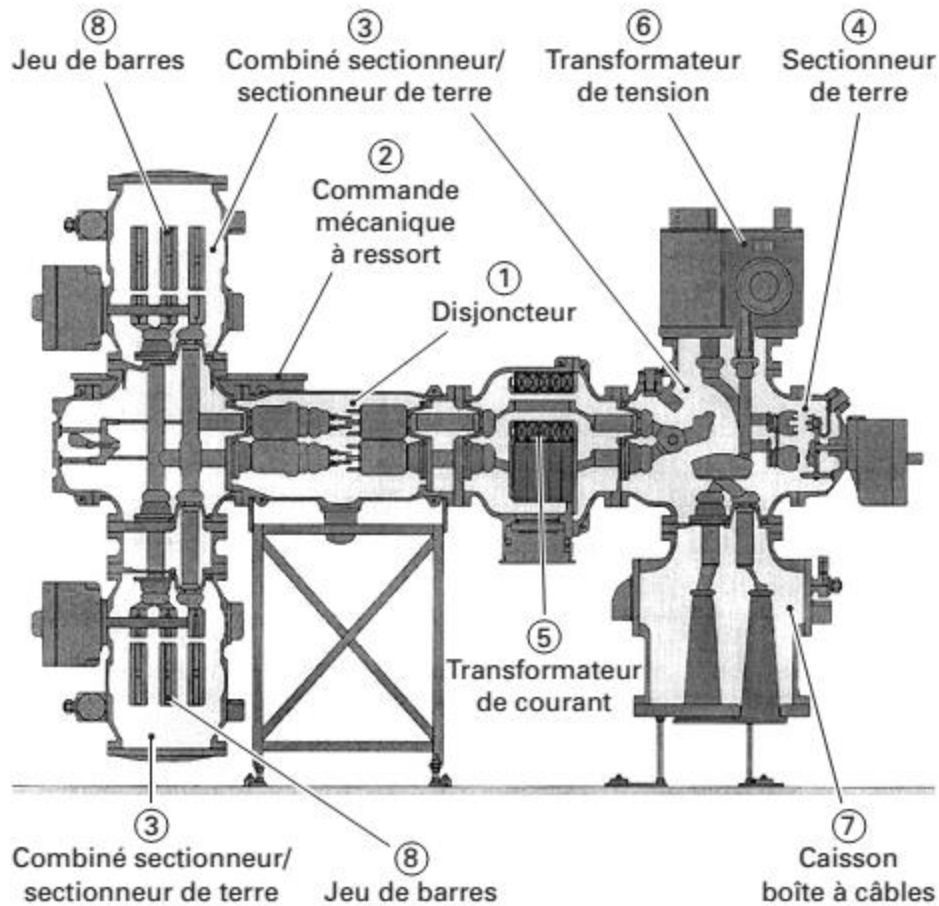


a) vue en coupe [Document Alstom]

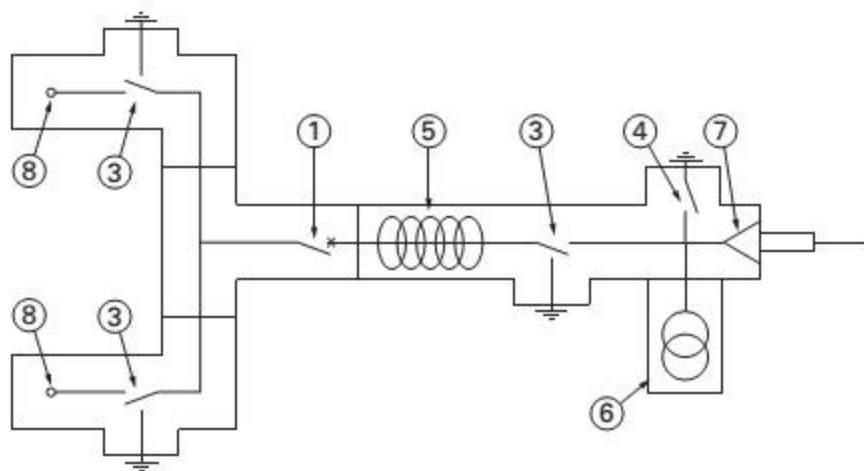


b) schéma unifilaire

Figure 10. Départ de poste à 245 kV à deux jeux de barres en matériel SEM monophasé.



a vue en coupe [Document Alstom]



b schéma unifilaire

Figure 11. Départ de poste à 100 kV à deux jeux de barres en matériel SEM triphasé.

5.2.3. Enveloppes

Le terme général d'enveloppes couvre, à la fois, celles utilisées dans les parties droites où elles sont de forme cylindrique régulière, celles contenant les appareils dont la forme est souvent plus complexe, et celles destinées aux changements de direction. Elles doivent être étanches et conçues pour supporter la pression de remplissage, elles devront, de plus, écouler les courants induits.

Elles comportent également les bossages ou usinages nécessaires pour la mise en place des vannes de remplissage, de la surveillance du SF₆, des membranes de sécurité et de la localisation des défauts internes.

Elles sont soit en acier, soit en alliage d'aluminium. Dans ce dernier cas, elles sont moulées ou corroyées, c'est-à-dire réalisées à partir de plaques roulées et soudées. Elles comportent, en extrémité, des brides qui portent les joints d'étanchéité et permettent les assemblages boulonnés qui assurent l'assemblage des enveloppes et la fixation des supports isolateurs.

Pour des raisons économiques, les enveloppes moulées sont de plus en plus souvent utilisées, un moule unique permet d'obtenir des variantes adaptées à des fonctions différentes en fonction de l'usinage de la pièce de base. Cette évolution a été rendue possible par l'amélioration de la précision, de l'état de surface et de l'étanchéité des pièces en alliage moulé.

Références Bibliographiques :

[1] Jean-Michel DELBARRE, "Postes à haute et très haute tension Rôle et structure", © Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique D 4 570.

[2] Louis DEVATINE , "Postes à haute et très haute tension, Rôle et structure", © Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique D 4 570v2.

[3] Jean-Pierre TAILLEBOIS, "Postes à haute et très haute tensions : Postes sous enveloppe métallique (PSEM), © Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique D 4 590.