

RESEAUX ELECTRIQUES

I. INTRODUCTION

A notre époque, et sans électricité, la vie quotidienne serait difficilement envisageable, il est donc nécessaire de savoir la produire de manière efficace et continue.

Pour répondre à la consommation croissante d'électricité, il a fallu inventer et construire des usines (centrales électriques) capables de produire de l'électricité en grande quantité. Une fois le courant produit, il doit être amené jusqu'aux consommateurs.

Dans un pays, le Transport et la Distribution Publique assurent le transit de l'énergie électrique entre les points de production et les points de consommation.

Pour la gestion des réseaux et la mise en place des départs pour l'alimentation des différents consommateurs, un certain nombre d'appareillages et d'équipements est nécessaire.

I.1. De la centrale aux abonnés

Les réseaux électriques sont constitués par l'ensemble des appareils destinés à la production, au transport, à la distribution et à l'utilisation de l'électricité depuis les centrales de génération jusqu'aux maisons de campagne les plus éloignées (**fig.I.1**).

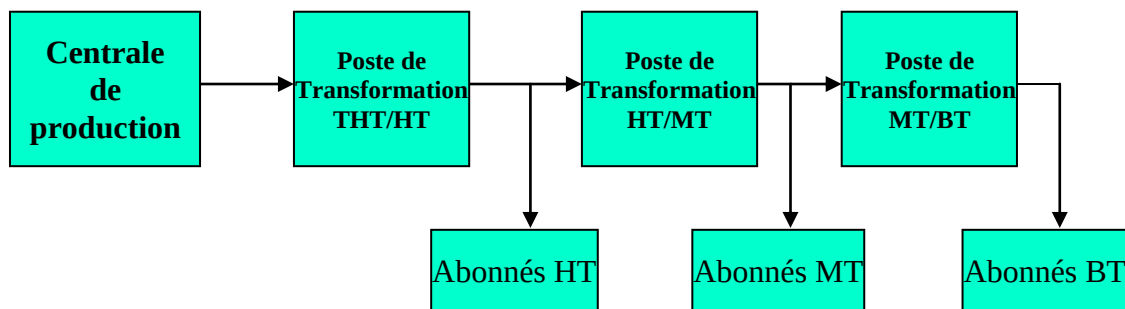


Figure I.1: Schéma d'un réseau électrique.

I.2. Les niveaux de tension des réseaux

Les réseaux sont hiérarchisés : (Figure I.2) d'une façon générale, la plupart des pays mettent en œuvre:

- 1- Un réseau de transport THT 220.....800 KV
- 2- Un réseau de répartition HT 60170 KV
- 3- Un réseau de distribution MT 5.....36 KV
- 4- Un réseau de livraison de l'abonné BT 400/230 V.

Cette hiérarchie c'est-à-dire, les niveaux de tensions utilisés varient considérablement d'un pays à l'autre en fonction des paramètres liés à l'histoire électrotechnique du pays, ses ressources énergétiques, sa surface et finalement des critères technico-économiques.

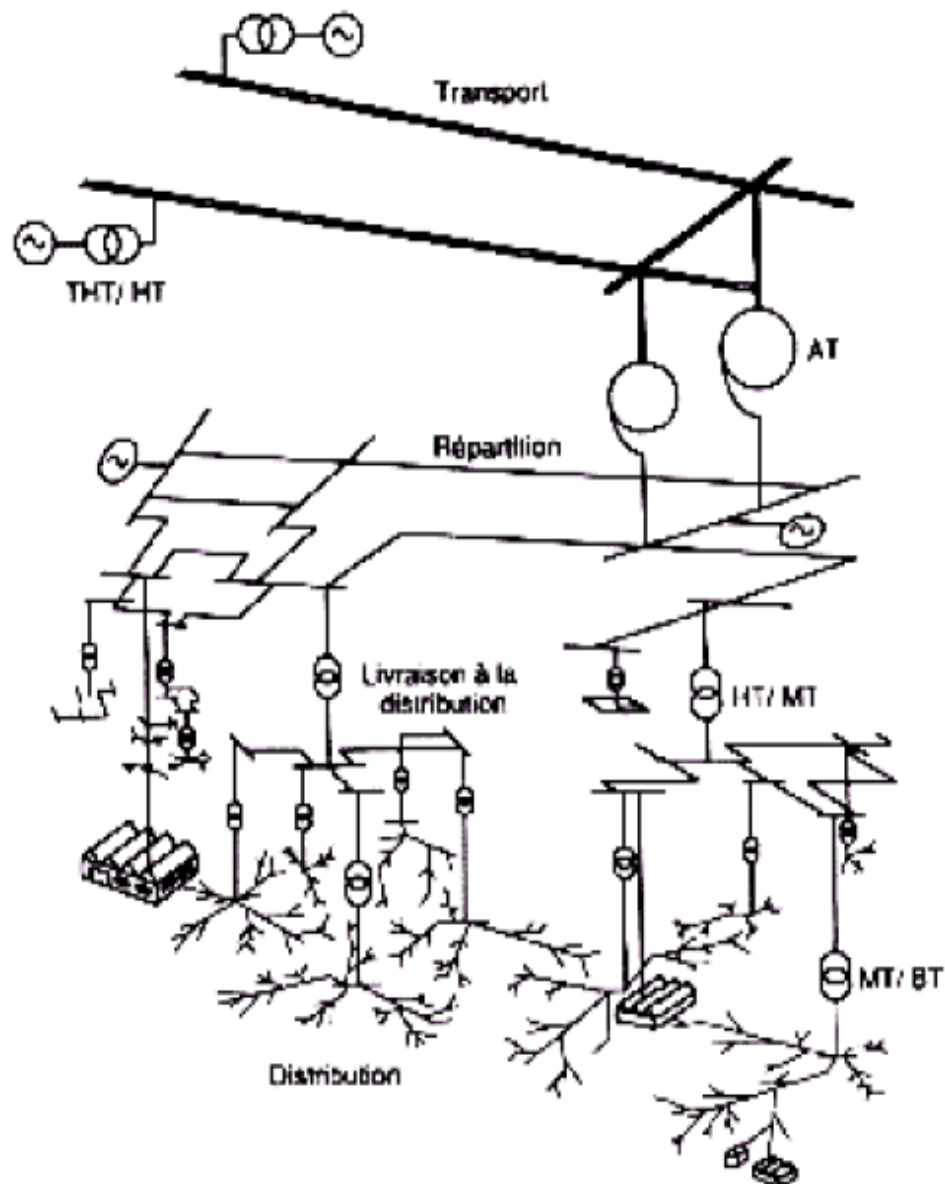


Figure I.2 : Hiérarchisation d'un réseau électrique.

I.3. Topologie des réseaux

Les réseaux de transport d'énergie et d'interconnexion sont, par nature, constitués d'ouvrages capables de forts transits et maillés. Les liaisons forment des boucles, réalisant ainsi une structure semblable aux mailles d'un filet (Fig.I.3.a).

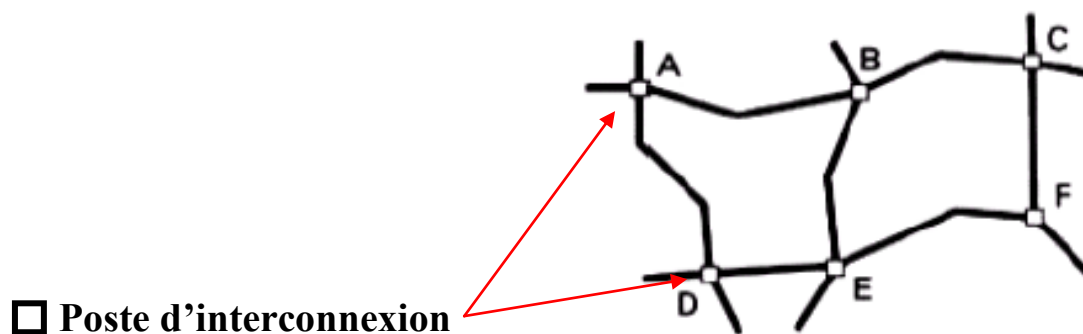


Fig. I.3.a. Exemple de structure maillée

Les réseaux de répartition qu'ils alimentent ont fréquemment une structure bouclée (**FigI.3.b**) 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 (**poste G, FigI.3b**) ou encore en piquage en prélevant une partie de l'énergie circulant sur une ligne reliant deux postes (**poste H, FigI.3b**).

□ Poste d'interconnexion

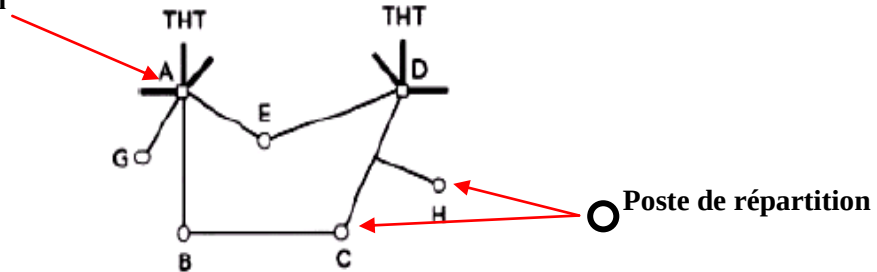
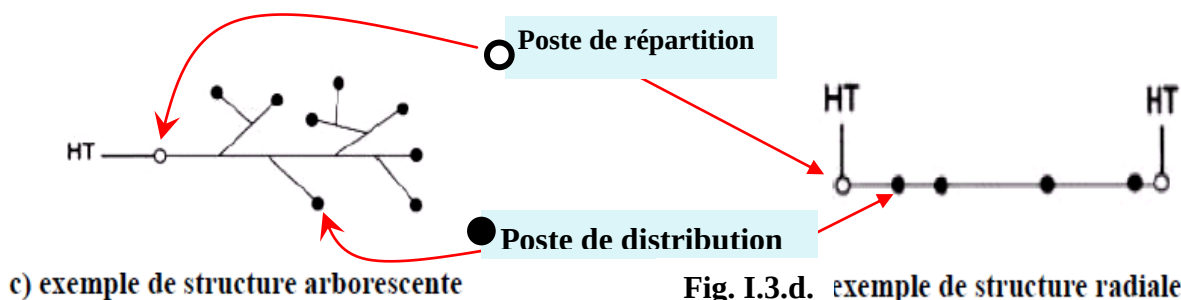


Fig. I.3.b. exemple de structure bouclée

Ces réseaux de répartition à caractère régional fournissent l'énergie aux réseaux de distribution qui sont des réseaux à moyenne tension assurant l'alimentation d'un grand nombre d'utilisateurs soit directement, soit après transformation en basse tension. 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 (**FigI.3.d**) ou des réseaux à structure arborescente (**FigI.3.c**).



c) exemple de structure arborescente

Fig. I.3.d. exemple de structure radiale

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.

II.PRODUCTION DE L'ENERGIE ELECTRIQUE

La production d'électricité est un secteur industriel vital, offrant à des clients, particuliers ou organisations, le service d'un approvisionnement régulier en énergie électrique. Les premières centrales électriques fonctionnaient au bois. Aujourd'hui, la production se fait à partir du pétrole, du gaz naturel, du charbon, de l'énergie nucléaire, de l'énergie hydraulique, de l'énergie solaire et de l'énergie éolienne.

Le producteur d'électricité doit pouvoir satisfaire les demandes de sa clientèle, à toute heure, au prix du Kilowatt – heure le plus bas.

L'énergie électrique est produite dans des centrales que l'on peut classer comme suite :

- Centrales hydrauliques ;
- Centrales thermiques classiques qui utilisent comme combustible le charbon, le fuel ou le gaz ;
- Centrales nucléaires ;
- Fermes éoliennes ;
- Centrale solaire.

II.1. Centrale Hydraulique :

II.1.1. Eléments principaux d'une centrale hydraulique :

L'énergie électrique produite par des centrales hydrauliques est particulièrement précieuse car elle est **gratuite**, elle est **renouvelable** et elle fait fonctionner les turbines avec un rendement **voisin de l'unité**.

Des **ouvrages d'amenée et de fuite** : ils comportent une prise d'eau reliée à un canal d'amenée qui a pour but de conduire l'eau en un lieu favorable à l'établissement de la chute. Ensuite une conduite forcée fait parcourir à l'eau la totalité de la chute tandis qu'une cheminée d'équilibre, placée à la jonction de la galerie et de la conduite forcée, est destinée à atténuer les **coups de bélier** (c'est-à-dire les variations de pressions qui se produisent quand on ferme l'arrivée d'eau à la turbine).

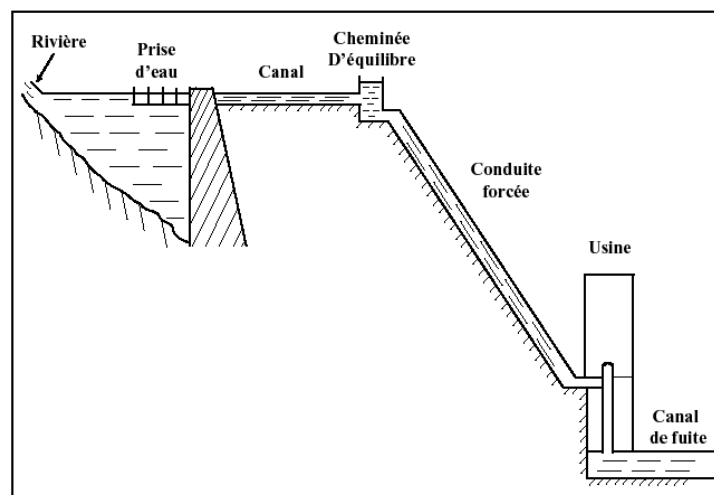


Fig. II.1. Amenée et fuite d'eau d'un barrage.

La **turbine** : c'est l'organe qui transforme l'énergie potentielle et l'énergie cinétique de l'eau en énergie mécanique. La roue en est la partie mobile entraînant l'arbre de rotation qui transmet l'énergie mécanique au générateur.

Suivant la hauteur de la chute d'eau, différents types de turbines sont utilisés :

Turbine Pelton : pour un débit faible et une grande hauteur de chute.



Fig. II.2. Turbine.

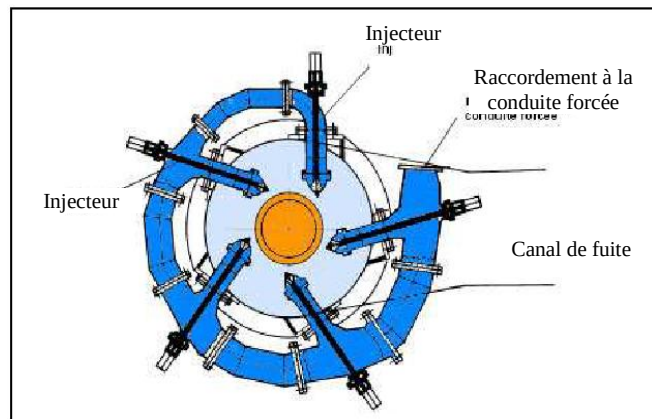


Figure. II.3. Injecteurs

Ils existent d'autres types de turbines comme (Turbine Francis, Kaplan (à Hélice)...etc).

- **Matériels électriques** : l'énergie mécanique de la turbine transmise par l'arbre est transformée en énergie électrique par un **alternateur** fournissant un courant électrique alternatif triphasé à 50 Hz (ou 60 Hz dans certains réseaux américains).
- Le **régulateur de tension** règle la tension avant couplage et la fourniture de réactif après couplage et il participe à la tenue de la tension du réseau.
- Les **transformateurs** élèvent les tensions des alternateurs (3,5 à 18 kV) à la tension du réseau (60 à 400 kV).

Le schéma électrique de puissance est simple. Entre les générateurs, les transformateurs de puissance et d'alimentation des auxiliaires et le point de livraison au réseau, les organes de coupure sont reliés par des jeux de barres aériens ou sous gaine.

- **Services Auxiliaires** : ils sont composés de matériels permettant de faire fonctionner la centrale et les groupes. Ils sont alimentés à partir du réseau de distribution ou à partir des jeux de barres de départ avec un secours par un groupe électrogène (Diesel) ou hydraulique auxiliaire capable de démarrer sur batterie.
- Les matériels les plus importants pour la sécurité sont les batteries, les pompes à huile de régulation, de graissage, les pompes à eau d'exhaure, de réfrigération. Les matériels de manutention principaux (ponts roulants) sont dimensionnés pour démonter un alternateur, la masse la plus importante est en général celle du rotor.

II.2. Centrale Thermique

II.2.1. Centrale à vapeur

Avec ce type de centrale, la vapeur est utilisée pour faire tourner le moteur primaire du générateur électrique (turbine). Dans ce processus, l'énergie thermique est convertie en énergie mécanique et par la suite en énergie électrique via un système turbine – génératrice.

L'énergie thermique est obtenue par combustion de fuel conventionnel (charbon, gaz, pétrole...). L'eau est utilisée pour générer de la vapeur dans la chaudière en brûlant du combustible. Les circuits primaires de circulation de vapeur de ce type de centrales peuvent fonctionner avec ou sans circuit de condensation. Dans les centrales non équipées de condenseur, la vapeur utilisée, dans le circuit primaire, est à une pression supérieure ou égale à la pression atmosphérique. Cependant, dans les centrales équipées de condenseur (les plus utilisées de nos jours), la vapeur, arrivant dans le condenseur, est à pression inférieure à la pression atmosphérique et cette vapeur est transformée en eau.

II.2.2. Alternateur

Dans une centrale électrique à vapeur, plusieurs unités de génération sont utilisées afin d'augmenter la capacité totale de la centrale. Pour la génération électrique, une génératrice synchrone à haute vitesse est utilisée car le rendement des turbines à vapeur est élevé aux grandes vitesses; pour des alternateurs à une paire de pôles, la vitesse de rotation de l'alternateur est de 3000 tr/min.

L'alternateur est commandé en puissance et en tension. Ce contrôle peut être réalisé par une de ces deux commandes :

- **Commande en puissance active et en fréquence** : elle est obtenue en agissant sur les entrées de la turbine (vapeur, eau...);
- **Commande en puissance réactive et en tension** : elle est obtenue en agissant sur l'excitation de la génératrice synchrone.

De nos jours l'excitation se fait au moyen d'une alimentation alternative (arrivant du générateur lui-même) et au moyen d'un redresseur. Ce dernier peut être fixe (utilisation de ballasts) ou rotatif.

L'alternateur doit être protégé contre :

- **Défaut externe de phase** : utilisé des relais de courant avec un temps inverse ;
- **Défaut entre phases** : utilisé les protections différentielles ;
- **Défaut entre phase et terre** : utilisé des relais de défauts à la terre ;
- **Défaut d'enroulement** : utilisé des protections différentielles ;
- **Surchauffe** : des relais thermiques.

II.3. Centrale à gaz

La technologie des turbines à gaz est la plus efficace pour la conversion des carburants fossiles en énergie électrique et ceux grâce aux nombreuses recherches menées dans ce domaine.

II.3.1. Centrale électrique simple équipée de turbines à gaz

II.3.1.1. Principe de fonctionnement :

Une telle centrale consiste en une chambre à combustion, un compresseur à air, une turbine et différentes auxiliaires pour lubrification, contrôle de la vitesse, alimentation en carburant et allumage.

Le fonctionnement de la turbine à gaz commence par l'arrivée de l'air atmosphérique au compresseur qui, à sa sortie, sa pression et sa température se voit augmenter. Cet air sous pression entre dans la chambre de combustion où le carburant brûle et fait augmenter la température de l'air sous pression. Le mélange de l'air chaud et sous pression ainsi que les produits de la combustion (mélange de gaz), vapeur d'air, s'étend à travers les gicleurs et leur vitesse augmente. Une énergie cinétique de la vapeur d'air est donc transmise aux ailettes de la turbine dont une partie est utilisée pour le compresseur (faire tourner son arbre) et le reste pour le travail de l'arbre du turbo – alternateur. La pression de la vapeur d'air diminue durant son trajet dans la turbine et elle finit par s'échapper à la pression atmosphérique.

II.4. Centrale Nucléaire

Une centrale nucléaire est une centrale électrique, utilisant la fission nucléaire de matières fissiles pour produire de la chaleur dont une partie est transformée en électricité.

Une centrale nucléaire est constituée d'un ou plusieurs réacteurs nucléaires (jusqu'à 7), dont la puissance électrique varie de 40 MW à plus de 1 450 MW.

II.4.1. Description

Une centrale nucléaire regroupe l'ensemble des installations permettant la production d'électricité sur un site donné. Elle comprend fréquemment plusieurs tranches, identiques ou non ; chaque tranche correspond à un groupe d'installations conçues pour fournir une

puissance électrique donnée (par exemple 900 MW, 1 300 MW ou 1 450 MW). En France, une tranche comprend généralement :

- Le **bâtiment réacteur**, enceinte étanche qui contient principalement le réacteur nucléaire, les générateurs de vapeur (trois ou quatre selon la génération), un pressuriseur, une partie du circuit d'eau secondaire et le circuit d'eau primaire, dont le rôle principal est d'assurer le transfert thermique entre le cœur du réacteur et les générateurs de vapeur ;
- Le **bâtiment salle des machines**, qui contient principalement :
 - Une ligne d'arbre comprenant les différents étages de la **turbine à vapeur** et de **l'alternateur** ;
 - Le **condenseur**.
- Des **bâtiments annexes** qui contiennent notamment des installations diverses de circuits auxiliaires nécessaires au fonctionnement du réacteur nucléaire et à la maintenance, les tableaux électriques alimentant tous les auxiliaires et générateurs diesel de secours ;
- Un **aéroréfrigérant atmosphérique** (la partie la plus visible d'une centrale nucléaire), ou simplement une **station de pompage** pour les tranches dont le refroidissement utilise l'eau de mer ou de rivière.

II.5. Centrales électriques éoliennes :

Les aérogénérateurs sont des machines qui transforment l'énergie contenue dans le vent en énergie électrique. Le principe de fonctionnement est que le vent fait tourner des pales solidaire au rotor d'une génératrice qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Il existe des petits générateurs éoliens de puissance inférieure ou égale à 10 kW. Il existe également des génératrices éoliennes de puissance comprise entre 500 kW et 2 MW.

II.5.1. Design des éoliennes modernes :

De nos jours les plus part des éoliennes modernes sont de type horizontales (l'axe du rotor est parallèle au sol). Les principales unités d'une génératrice éolienne sont (voir Fig. II.4) :

- Un **rotor** ;
- Un **train d'entraînement principal** ;
- Une **nacelle** ;
- Le **mat** et les **fondations** ;
- La **commande** ;
- Un **poste de livraison** permet de relier ce parc au réseau électrique pour y injecter l'intégralité de l'énergie produite ; il comprend des disjoncteurs et des transformateurs.

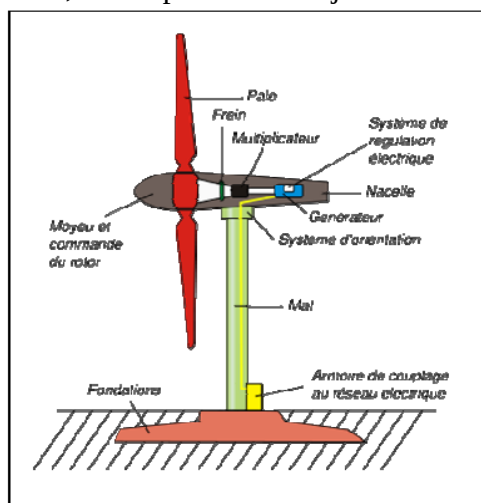


Fig. II.4. Eolienne de type aérogénérateur.

II.5.2. Fermes éoliennes

Une ferme éolienne est une centrale électrique équipée de plusieurs génératrices éoliennes qui sont électriquement connectées. L'avantage est d'accroître, pour une zone donnée propice à ce type de production électrique, la puissance électrique produite et de diminuer les coûts.

II.5.3. Avantages et inconvénients de la production éolienne

Les avantages sont:

- L'énergie primaire d'origine éolienne est :

- gratuite - le vent ;
- renouvelable ;
- sans production de déchets ;
- sans danger ;

- La fabrication des 3 éléments d'un aérogénérateur (pale, générateur et mat) ;

- Le coût de fabrication est comparable à celui de générateurs hydrauliques de puissance équivalente. Ces avantages certains sont aussi ceux de l'énergie hydraulique.

Les inconvénients de la production électrique éolienne est sa disponibilité qui peut être faible, très intermittente (le vent souffle pendant des durées très variables) ou imprévisible (vent souffle n'importe quand).

II.6. Centrales solaires

Ces cellules transforment directement l'énergie solaire en énergie électrique ; ce qui, pour une centrale électrique équipée de ces cellules, l'installation thermique, lourde et compliquée, n'est plus nécessaire.

Une photopile est constituée d'un matériau absorbant l'énergie des photons et la transforme en énergie électrique ; le matériau de base actuellement utilisé est le silicium.

On peut présenter une photopile par le circuit électrique équivalent de la figure ci-dessous.

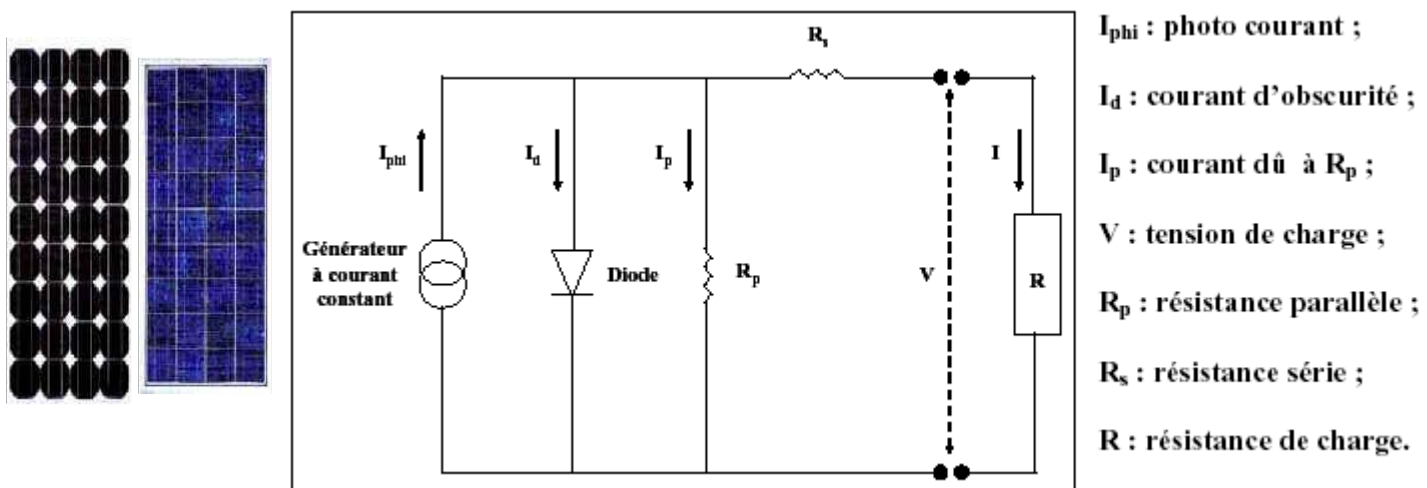


Fig. II.5. Circuit électrique équivalent d'une photopile.

II.6.1. Mise en œuvre :

Dans la pratique les panneaux photovoltaïques regroupent généralement des cellules élémentaires en série et en parallèle afin d'obtenir suffisamment de courant (parallèle) sous une tension acceptable (série). La puissance d'un tel panneau est donnée en Watt crête (Wc).

Une installation photovoltaïque ne se limite pas aux panneaux photovoltaïques. En effet, il faut leur associer :

- Des **batteries** pour tenir compte du déphasage entre la production électrique et la consommation ;
- Une **diode anti-retour** qui évite le déchargement des batteries lorsque les panneaux ne sont plus ensoleillés ;
- Un **régulateur** qui gère la charge des batteries en leur évitant d'être en surcharge ou en décharge profonde ;
- Eventuellement un **onduleur** pour transformer le courant continu en courant alternatif.

II.6.2. Avantages et inconvénient de ce type de production électrique :

Comme avantage on peut citer :

- Absence de pièces mobiles, source de pannes potentielles ;
- Possibilité de moduler facilement la puissance installée en faisant varier le nombre de panneaux photovoltaïques connectés ;
- Coût de fonctionnement négligeable ; en effet il faut prendre soins juste à maintenir propre la surface des panneaux ;
- Absence de pollution (ni émission de gaz ni bruit) ;
- Energie primaire gratuite et renouvelable.

Les inconvénients sont :

- Une technologie de fabrication délicate et complexe et est loin d'être exempte de pollution ;
- L'obligation de prévoir des batteries de stockage pour subvenir aux besoins durant les périodes nocturnes ;
- Obligation de prévoir un onduleur.

III. TRANSPORT DE L'ENERGIE ELECTRIQUE

III.1. Introduction :

La fonction du réseau de transport est de relier le monde de la production au monde de la consommation. Il transmet l'énergie et les secours (en énergie) d'une région à une autre mais également les perturbations et les défauts.

Il est plus difficile d'exploiter un réseau électrique qu'un réseau de distribution de gaz et d'eau, car il n'est pas possible de stocker l'énergie électrique.

Ainsi doit-on produire, à chaque instant, l'énergie nécessaire à la consommation immédiate. Cette règle pose de difficiles problèmes au producteur qui établit, à l'avance, un programme journalier tenant compte de la demande habituelle des usagers qui sont fonction de la saison et des heures de la journée (heure pleine, pointe et creuse).

Si l'énergie n'est pas stockable, elle présente, en revanche, l'avantage d'être facile à transporter à de grandes distances par de simples fils conducteurs. Il faut cependant noter que ce transport est assez coûteux par les installations qu'il exige ainsi que par les pertes d'énergie dans les lignes. Il faudra donc tenir compte de ces frais dans le prix de vente du kWh à la consommation qui doit être bien entendu le plus bas possible.

Ils existent deux modes de transport de l'énergie électrique :

- En **courant alternatif** (en Algérie de fréquence 50 Hz) ;
- En **courant continu** (inexistant en Algérie).

Dans tout ce qui suivra, nous nous limiterons aux réseaux électriques à courant alternatif vu que seul 1 % des réseaux électriques mondial est en continu et aucun réseau à courant continu n'existe en Algérie.

On distingue traditionnellement trois types de réseaux :

- Les **réseaux de grand transport et d'interconnexion** liant les grands centres de production aux grands centres de consommation, liant également les grandes régions entre elles ; en Algérie, les tensions de ces réseaux sont : 220 kV et 400 kV.
- Les **réseaux de répartition** qui, recevant de l'énergie électrique des réseaux précédents, l'amène aux bords des petites villes, à l'intérieur de celles-ci, à des groupes de villages ou chez les gros consommateurs industriels ; en Algérie, les tensions de ces réseaux sont : 60 et très peu de 90 kV.
- Les **réseaux de distribution** qui irrigue le terrain jusqu'à atteindre la clientèle domestique et les clients industriels de taille moyenne ; en Algérie, les tensions utilisées sont le 30, 10 kV et bien entendu la basse tension.

III.2. Constitution des réseaux :

Pour réaliser la liaison entre la production et la consommation, il est nécessaire d'établir des lignes aériennes et des canalisations souterraines. Ces lignes sont raccordées à des nœuds appelés **postes**. Ces derniers ont un rôle clé dans l'exploitation du réseau : c'est là où se trouve les dispositifs de coupure et de connexion, les transformateurs, les appareils de mesures, de contrôle, de commande, les moyens de compensation d'énergie réactive, etc.

- Toute liaison (du réseau) peut être l'objet d'un défaut électrique (un court-circuit) qui nécessite son isolement immédiat au moyen d'un disjoncteur. La détection des courants de court-circuit, liée à l'apparition d'un défaut, ainsi que la nécessité de contrôler les transits et les tensions existant à chaque instant sur les différents circuits du réseau, conduisent également à prévoir un ensemble d'appareillage de mesure. Ces derniers, les disjoncteurs et les appareillages à haute tension de protection forment une cellule, voir Fig.III.1

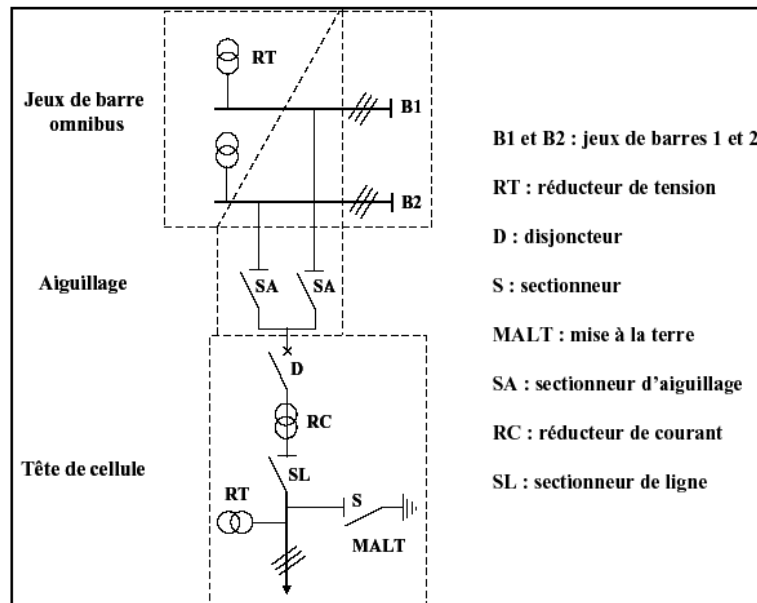


Fig. III.1. Schéma type d'une cellule de ligne THT.

III.3. Lignes et câbles à haute tension :

III.3.1. Lignes HT :

Une ligne aérienne HT est constituée d'un ensemble de conducteurs assurant avant tout la continuité électrique et réalisant une connexion entre deux nœuds (postes) d'un réseau électrique.

Dans cette partie, nous allons décrire brièvement, les contraintes de conception d'une ligne aérienne HT et les différents matériels la constituant. Nous présenterons également le modèle des lignes HT.

III.3.2. Matériels entrants dans la constitution d'une ligne aérienne

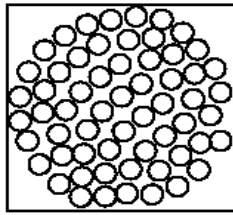
III.3.2.1. Conducteurs

Les conducteurs utilisés dans la construction des lignes aériennes sont, d'une façon générale, des câbles et, exceptionnellement, des fils ronds uniques, mais seulement en fils de cuivre de diamètre inférieur ou égal à 5 mm. Nous pouvons trouver des conducteurs en :

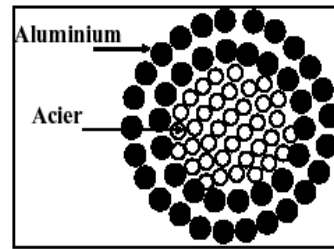
- **Cuivre** : ce matériau n'est plus utilisé pour les lignes à haute tension ;
- **Aluminium – Acier** : les câbles sont une combinaison de fils d'acier galvanisé formant l'âme du conducteur, sur la quelle est câblé un nombre convenable de couches de fils d'aluminium ;
- **Alliage d'aluminium (Almélec)** : c'est le matériel le plus fréquemment utilisé ; c'est un alliage comprenant du magnésium et du silicium. L'avantage de cet alliage est sa contrainte de rupture en traction qui permet de l'utiliser en câble homogène, même pour des portées de longueur importante.

Les câbles sont normalement formés de couches successives de brins ronds à sens d'enroulement alternés, de façon à limiter le plus possible les réactions de torsion (Fig. III.2).

Lorsque tous les brins ont le même diamètre, le câble est dit **équilibrin**.



- Equibrin



- Homogène Non équilibrin en aluminium – acier.

Fig. III.2. Conducteurs usuels.

III.3.2.2. Câbles de garde :

Sur une ligne aérienne, on trouve des câbles de gardes dont le rôle est multiple,

- Protection contre les coups de foudre directs,
- Diminution de l'induction dans les circuits de télécommunication ou les conduits enterrés,
- Interconnexion des mises à la terre des supports,
- Utilisation en télécommunication.

III.3.2.3. Isolateurs :

Les isolateurs entrent dans un faible pourcentage dans le prix d'une ligne aérienne, mais ils en sont un élément essentiel. Leur rôle est de relier les conducteurs sous tension aux supports et d'assurer l'isolement électrique entre ces deux parties constitutives de la ligne.

III.3.2.4. Supports des lignes aériennes :

Les différentes dispositions des conducteurs (ou armement de la ligne) sont :

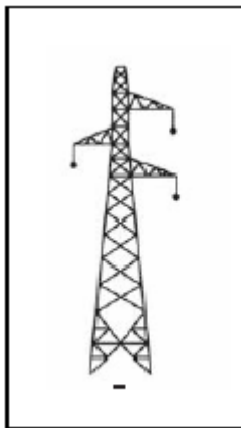


Fig. III. 3. Armement en triangle.

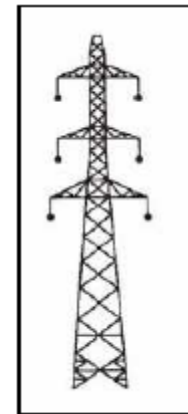
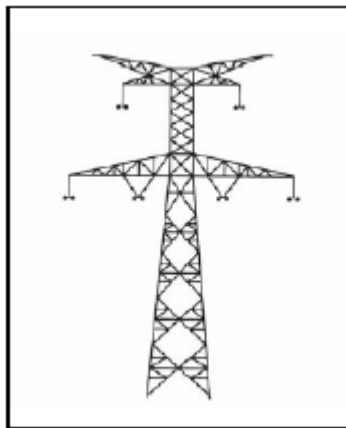


Fig. III. 4. Armement en drapeau.

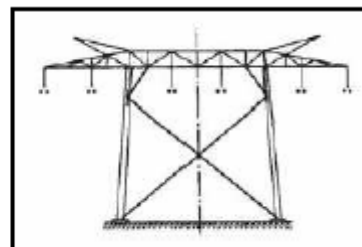
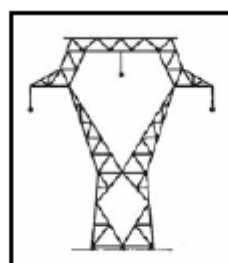
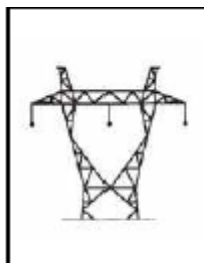


Fig. III. 5. Armement en nappe.

III.3.3. Câbles HT :

Les performances des câbles souterrains ont beaucoup évoluées ces dernières années grâce aux nouvelles technologies, c'est ainsi qu'on a pu fabriquer câbles fonctionnant à une tension élevée telle que 400 kV.

Alors que le câble souterrain est le plus souvent tripolaire, aux BT et MT, il est le plus souvent unipolaire aux HT et THT.

III.4. Classification des lignes

Les lignes de transport sont représentées dans trois catégories :

- **Lignes courtes** : de longueurs inférieures à 80 km. La capacité de la ligne peut être négligée, l'inductance et la résistance en série peuvent être considérées comme des paramètres locaux, voir figure ci-dessous.
- **Lignes moyennes** : de longueur comprise entre 80 et 200 km, La capacité de la ligne ne peut pas être négligée, cependant l'inductance et la résistance, en série, peuvent être considérées comme des paramètres locaux. La capacité est également considérée comme un paramètre local, et peut être représentée en **T** ou en π , voir figure ci-dessous.
- **Longues lignes** : de longueur supérieure à 200 km pour la quelle une représentation précise est nécessaire. La ligne peut être représentée par des modèles en **T** ou en π avec des paramètres (résistance, inductance et capacité) distribués.

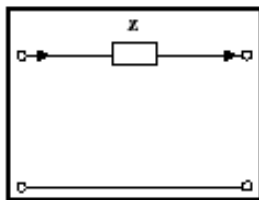
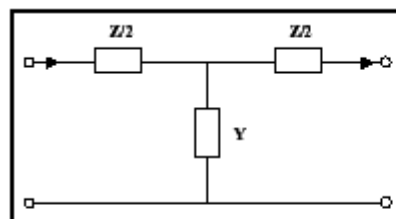
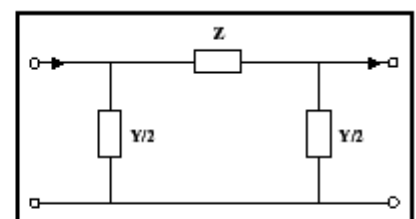


Fig. III. 6. Ligne de transport courte.



(a) modèle en T



(b) modèle en π

Fig. III. 7. Ligne moyenne de transport.

III.4.1. Ligne de transmission courte

Le modèle d'une ligne courte de transport et son diagramme de phase sont donnés sur la figure ci-dessous.

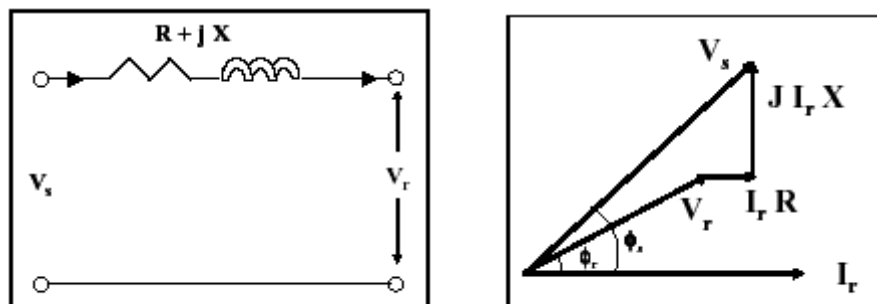


Fig. III. 8. Ligne courte de transport et son diagramme de phase.

Le courant de sortie (I_r) est pris comme référence. R et X sont respectivement les résistances et inductance par phase de la ligne de transport. Du diagramme de phase, nous avons

III.4.2. Lignes moyennes :

Quand la longueur de la ligne est supérieure à 80 km, la capacité de la ligne ne peut plus être négligée. Même si cette capacité est distribuée le long de la ligne, nous pouvons supposer qu'elle a une valeur localisée soit au centre de la ligne (modèle **T**) ou à chacune de ces extrémités (modèle en π).

III.4.2.1. Modèle en T :

Le modèle en **T** d'une ligne de transport est donné sur la figure ci-dessous. Pour l'étude, il est préférable de prendre le courant de sortie comme référence. Le diagramme de phase est représenté dans la figure ci-dessous.

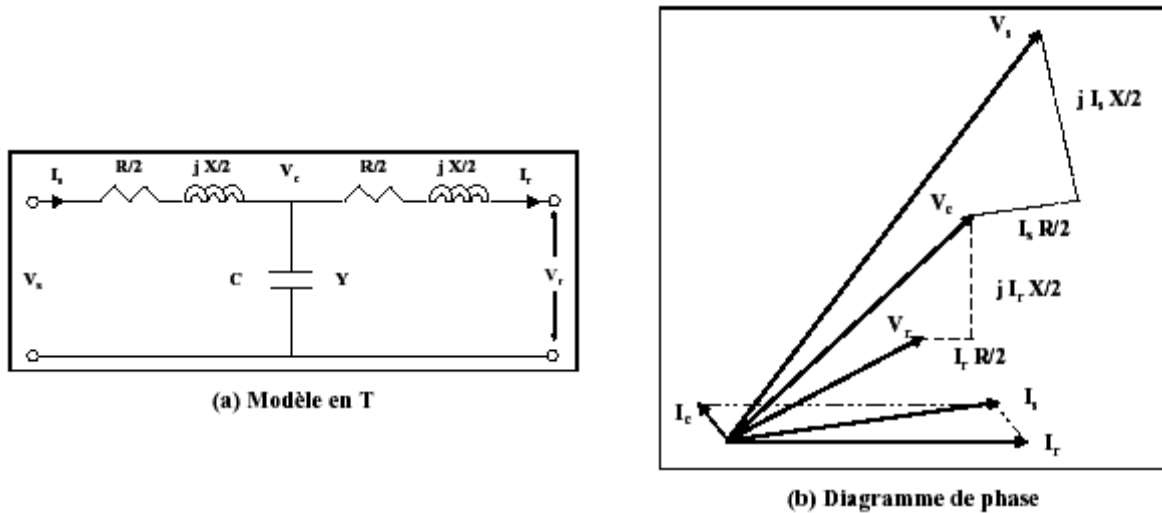
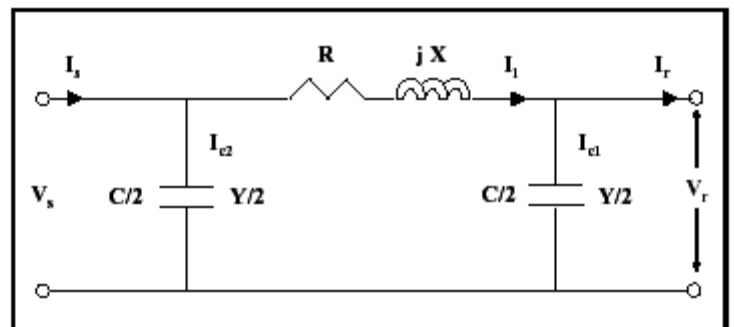


Fig.III.9. Modèle en T d'une ligne de transport et son diagramme de phase.

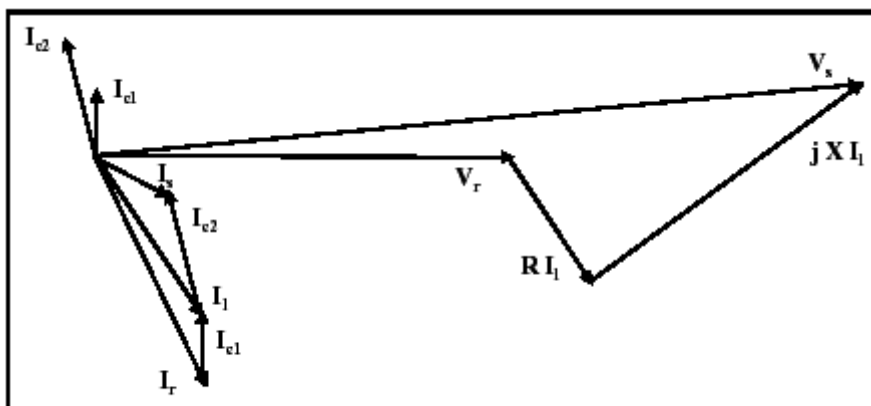
III.4.2.2. Modèle en π :

Le modèle en π d'une ligne de transport est donné sur la figure ci-dessous. Pour l'étude, il est préférable de prendre la tension de sortie comme référence. Le diagramme de phase est représenté dans la figure ci-dessous.

Fig.III.10. Modèle en π d'une ligne de transport et son diagramme de phase.



(a) Modèle en T



(b) Diagramme de phase

IV- Appareillages électriques :**IV.1- Appareils de protections électriques :**

Les équipements électriques sont dimensionnés et conçu pour fonctionner sous des conditions nominales de tension et de courant. Il est donc nécessaire de procéder à la protection des installations contre les surintensités, les surtensions et les manques de tension. Toute fois, on ne s'intéressera, dans ce cours, qu'à la protection contre les surintensités. Tout appareil de protection comporte un élément détecteur du défaut et un élément de coupure du circuit. Les appareils les plus utilisés sont les coupe-circuits et les relais de protections.

IV.1.1- Coupe-circuit à fusibles :

Le coupe-circuit à fusibles est un appareil de connexion permettant d'ouvrir un circuit par fusion d'un élément calibré. Ils sont symbolisés de la façon suivante :

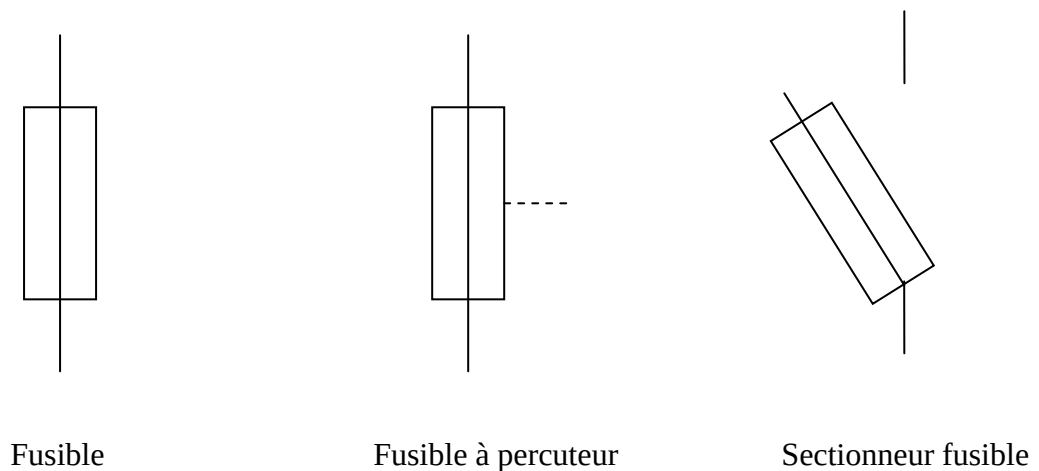


Fig.IV.1 Les coupes circuit à fusibles

Les éléments fusibles peuvent se présenter sous forme de cartouches cylindriques ou de cartouches à couteau :

- a. **Coupe-circuit à cartouche cylindrique :** il se constitue principalement d'une lame fusible et d'une cartouche HPC (haut pouvoir de coupure) contenant un sable réfrigérant et extingueur de l'arc. On l'utilise pour les courants qui avoisinent les 100A, il se monte généralement avec le sectionneur.
- b. **Coupe-circuit à cartouche à couteaux :** Il a un pouvoir de coupure de coupure plus important, il contient :
 - Un élément fusible.
 - Une enveloppe très solide qui supporte les chocs thermiques et électrodynamiques très importants lors de la coupure ;
 - Sable dont le rôle est de refroidir et d'étouffer l'arc ;
 - Un système de détection de fusion.

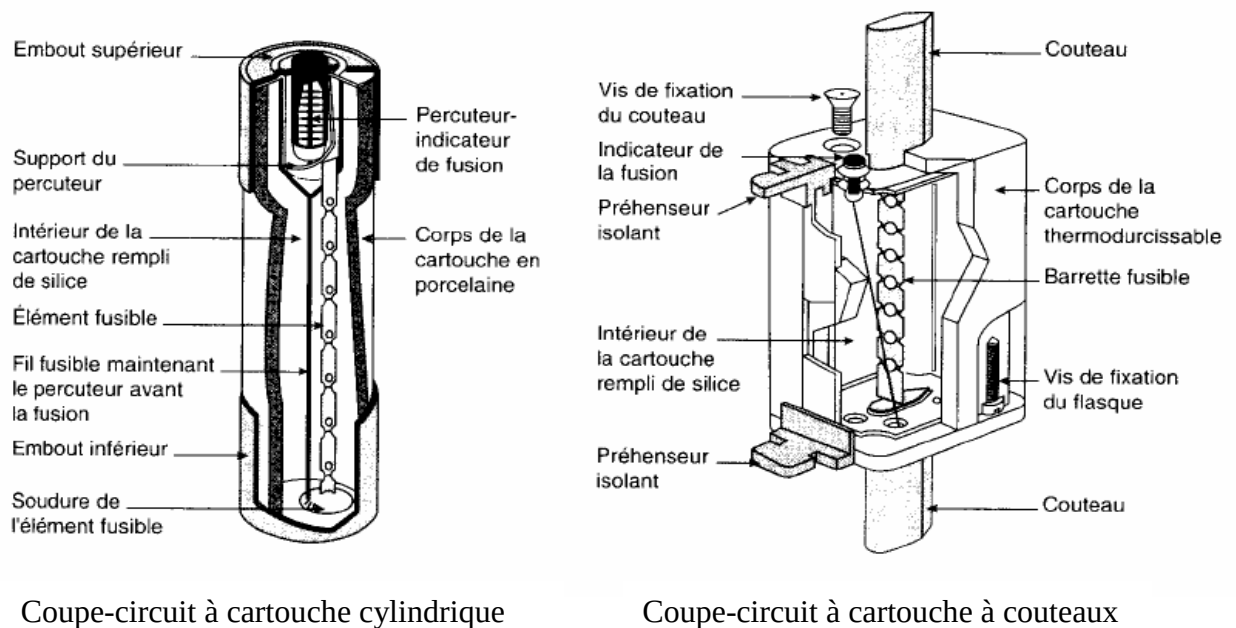


Fig.IV.2 Les figures en coupe des coupes circuits

IV.1.2- Relais de protection :

Leur rôle est de détecter le défaut et de commander l'interrupteur à pouvoir de coupure à l'ouverture. C'est l'action de l'ouverture qui protège le circuit. On distingue trois types : Les relais thermiques, électromagnétique (magnétique) et magnétothermique.

IV.1.2.1- Relais thermiques :

a. Principe :

Le relais thermique est destiné à assurer une protection contre les surcharges faibles et prolongées. Quand l'intensité du courant dépasse la valeur de réglage, la bilame qui est constituée de deux lames métalliques dont le coefficient de dilatation de l'une est très différent de l'autre, s'incurve sous l'effet de la température dégagée par le courant. Lorsque la déformation est suffisante, elle provoque l'ouverture de l'interrupteur électrique.

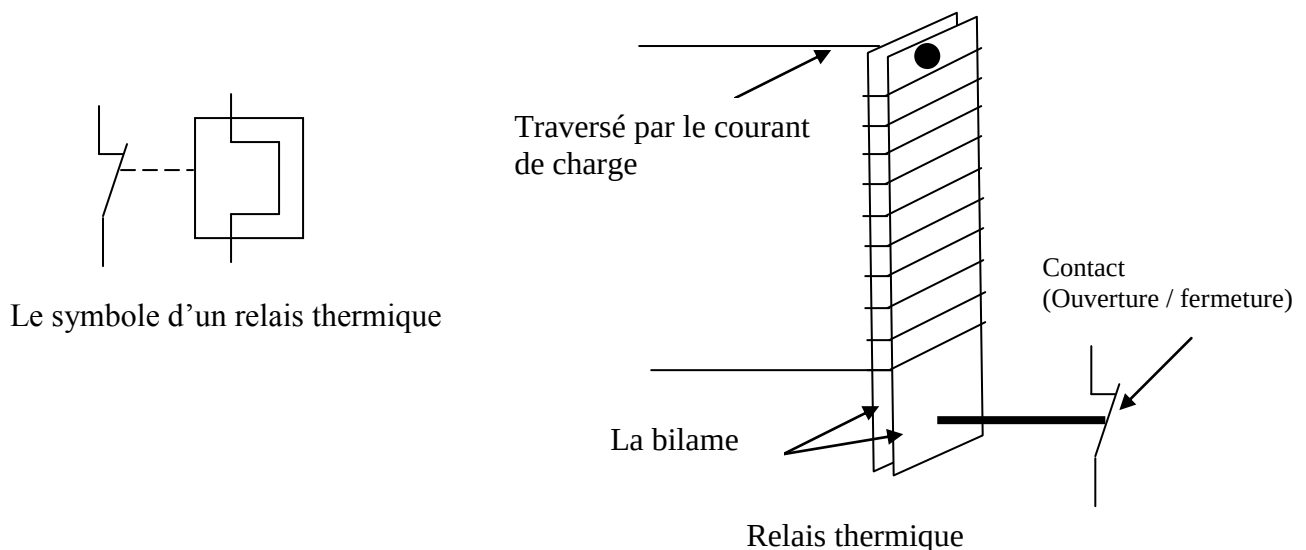


Fig.IV.3 Le principe des relais thermiques

Le relais thermique, quand il est associé à un contacteur, commande ce dernier à l'ouverture en ouvrant son contacte dans le circuit de commande de ce dernier. Alors que quand il est associé à un disjoncteur, l'incurvation de la bilame actionne le système de déverrouillage du disjoncteur.

b. Caractéristique du relais thermique :

Le relais thermique protège contre les surcharges prolongées et dangereuses. Sa caractéristique thermique définit le temps de retard de son action pour chacune des valeurs du courant le traversant.

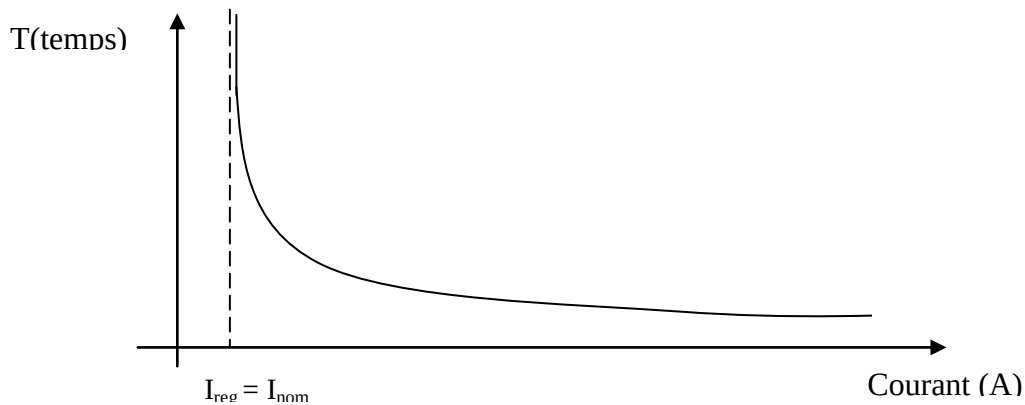
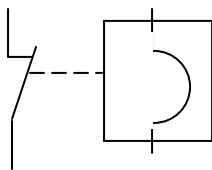


Fig.IV.4 Caractéristique du relais thermique

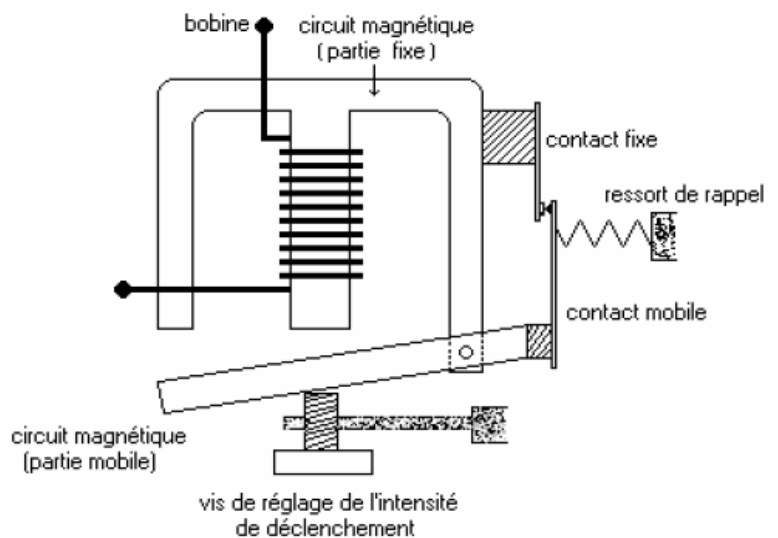
A chaque fois que le courant de la surcharge est important le temps de retard à l'action du relais se réduit. Le temps de retard correspond au temps consommé par la bilame pour parcourir la distance la séparant du contact. Si le courant est inférieur au courant de réglage qui est lui-même égal au courant nominal de l'équipement à protéger, le relais ne réagit pas !

IV.1.2.2- Relais électromagnétique (magnétique) :

Il est destiné à assurer une protection contre les variations brusques et importantes du courant de charge. Son action est instantanée.



Le symbole d'un relais thermique



Le relais magnétique

Fig.IV.5 Le principe Le relais magnétique

Le relais magnétique comprend un circuit magnétique qui, lui-même, se compose de deux parties, une fixe et une autre mobile, d'un bobinage parcouru par le courant à contrôler et d'un contact fermé au repos.

En fonctionnement normal, le champ magnétique produit par la bobine parcourue par le courant de charge est insuffisant pour attirer l'armature mobile. Lors d'une surintensité importante, l'armature est attirée par le champ magnétique et cette dernière ouvre instantanément le contact dans le circuit de commande du contacteur, si non déverrouille le disjoncteur et le commande à l'ouverture.

Le réglage de l'intensité de déclenchement s'effectue en agissant sur l'enfer de l'ouverture mobile, qui est la distance qui sépare les deux parties, fixe et mobile, du circuit magnétique.

IV.1.2.3- Relais magnétothermique :

Le relais magnétothermique se compose d'un élément magnétique et d'un autre thermique. Il conjugue donc l'action des relais magnétique et thermique. Il est donc destiné à assurer une protection contre les surcharges prolongées et dangereuses ainsi que les variations brusques et importantes du courant de charge.

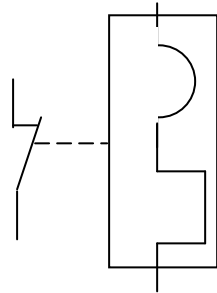


Fig.IV.6 Le symbole d'un relais magnétothermique

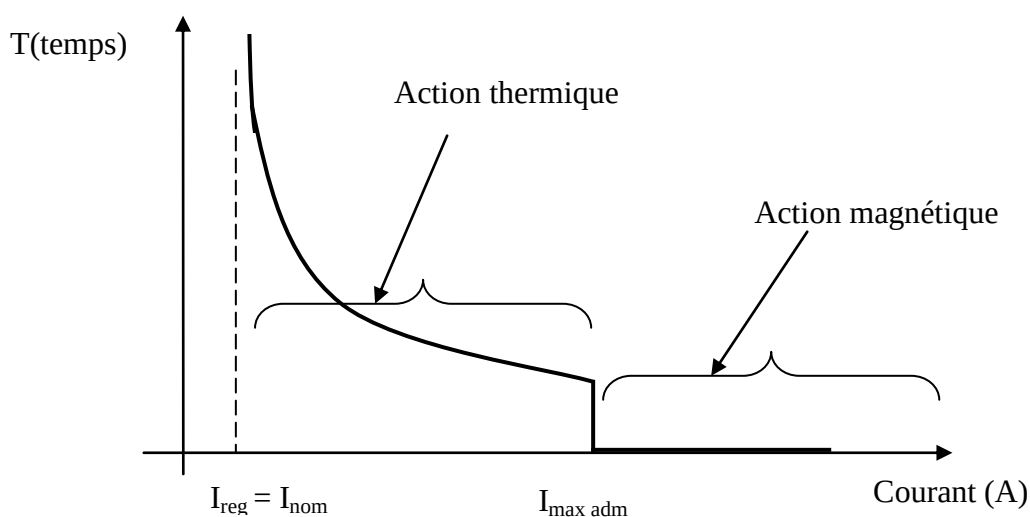


Fig.IV.7 Caractéristique du relais magnétothermique

Si $I_{ch} \leq I_{nom}$: (le courant de charge est inférieur ou égal au courant nominal de la charge à protéger), il n'y a donc pas de surcharge, le retard à l'action du relais magnétothermique est infini, ce qui veut dire que le relais ne réagit pas.

$I_{nom} < I_{ch} < I_{max adm}$: (le courant de charge est supérieur au courant nominal de la charge à protéger est inférieur au courant maximum admissible dans le circuit) c'est la membrane thermique qui sera appelé à réagir pour protection et son action est retardée.

$I_{ch} \geq I_{max adm}$: (le courant de charge est supérieur au courant maximum admissible dans le circuit) c'est la membrane magnétique qui réagira pour protection et son action est instantanée.

IV.2- Appareils d'interruptions électriques :

a. Définition :

L'appareil interrupteur sert à isoler, connecter ou protéger un équipement ou toute une installation électrique. On distingue des interrupteurs sans pouvoir de coupure symbolisés par des sectionneurs, des interrupteurs avec pouvoir de coupure qui sont de deux types, des contacteurs et des disjoncteurs.

b. Le pouvoir de coupure :

C'est une grandeur très importante pour tout appareil utilisé pour interrompre des circuits en charge. Elle correspond à la valeur maximale de courant que l'interrupteur peut couper en toute sécurité, sans subir des détériorations, ($PC = 100A, 600A, 1000A, 10\,000A$). Chaque manœuvre d'ouverture ou de fermeture d'un circuit en charge s'accompagne d'un arc électrique. L'action thermique de ce dernier peut facilement détériorer les contacts, s'il n'engendre pas d'incidents majeurs.

L'extinction de cet l'arc électrique qui apparaît entre les contacts, lors de la coupure, est un problème important pour tout interrupteur. Le dispositif d'extinction adopté pour chaque interrupteur détermine largement le pouvoir de coupure de ce dernier.

Parmi les dispositifs d'extinction utilisés :

- Boîtier de rupture ou pare-étincelles ;
- Balayage mécanique ;
- Soufflage magnétique ;
- Chambre d'extinction à huile ;
- Système à vapeur saturée, à gaz ou à air comprimé ;

IV.2.1- Appareils interrupteurs sans pouvoir de coupure :

Les appareils interrupteurs sans pouvoir de coupure sont symbolisés par des sectionneurs. Ils sont utilisés pour interrompre la continuité d'un circuit. Ne possédant pas de pouvoir de coupure, Ils manœuvrent généralement à vide. Ils permettent des ouvertures visibles lors de l'isolement des installations, surtout pour les moyennes et hautes tensions. Dans la basse tension, les sectionneurs sont fréquemment porteurs de fusibles de protection.

Les sectionneurs sont munis très souvent de contacts de pré-coupures qui sont utilisés pour commander à l'ouverture d'autres interrupteurs à pouvoir de coupure. Ses derniers s'ouvrent toujours une fraction de seconde avant l'ouverture du sectionneur, assurant ainsi une ouverture à vide de ce dernier.

Les sectionneurs qui ne sont pas munis de contacts de pré-coupures ont très souvent une poignée de commande verrouillable.

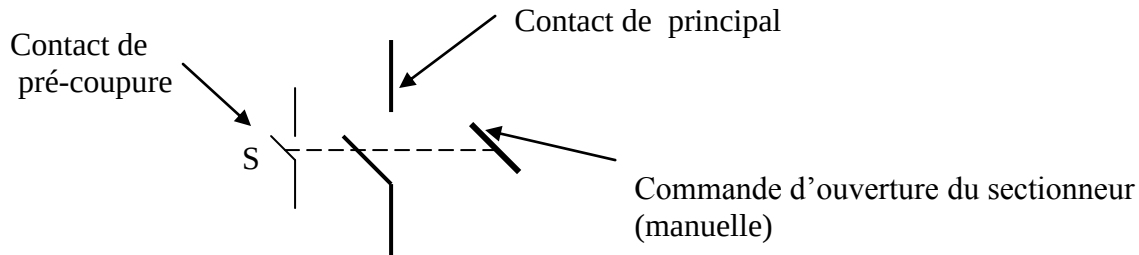


Fig.IV.8 Le Symbole de sectionneur

La dénomination d'un sectionneur tiens compte du nombre pôles des tensions et d'intensités nominales de l'existence de contacts auxiliaires ainsi que de la nature de commande.

Ex : sectionneur sans fusible, tripolaire, tension nominale d'isolement 660 V, intensité 125 A, 02 contacts auxiliaires de pré-coupure, commande par poignée extérieur verrouillable.

IV.2.2- Appareils interrupteurs avec pouvoir de coupure :

a. Le Disjoncteur :

Le disjoncteur est un interrupteur électrique avec pouvoir de coupure à commande manuelle, basée sur un système mécanique de verrouillage-déverrouillage, ce qui lui permet d'avoir deux positions de repos, l'une à l'ouverture l'autre à la fermeture et cela que la tension soit disponible ou pas.

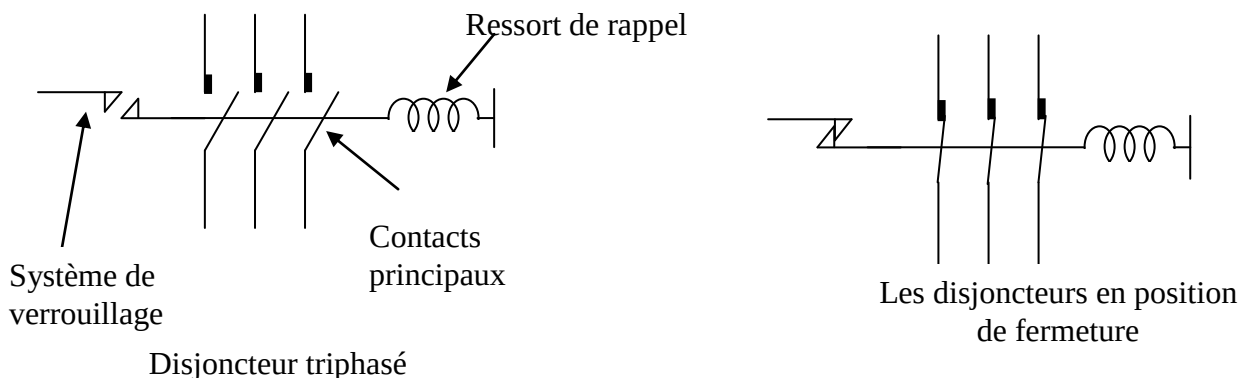


Fig.IV.9 Le principe du disjoncteur

Pour leur rôle de protection les disjoncteurs sont associés à des relais. Selon le relais qui leur est associé, on trouve, des disjoncteurs thermiques, magnétiques et magnétothermique.

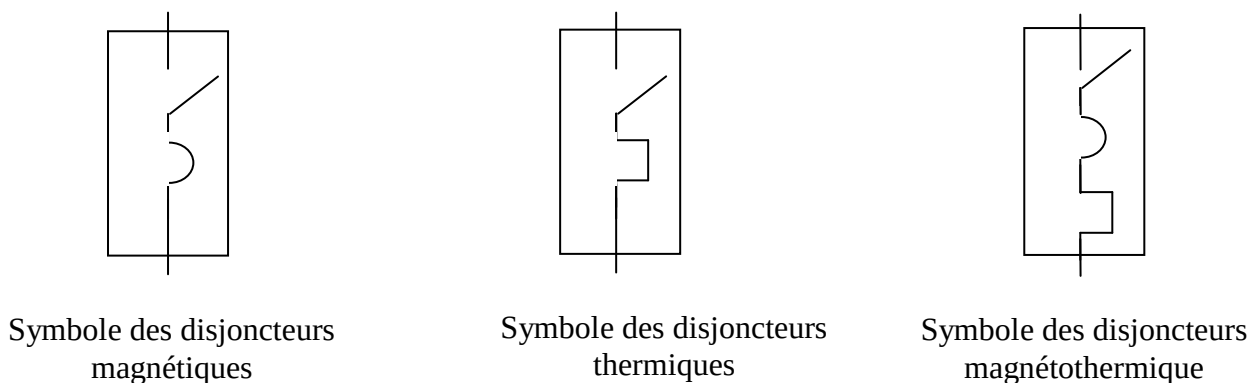


Fig.IV.10 Les différents symboles des disjoncteurs

L'action des relais thermiques et magnétiques, à la détection du défaut consiste à agir sur le système de déverrouillage pour provoquer l'ouverture du disjoncteur. L'action des deux relais est différente, mais il agisse sur le même mécanisme de déverrouillage.

b. Le Contacteur :

Le Contacteur est un interrupteur électrique avec pouvoir de coupure à commande électrique, n'ayant qu'une seule position de repos correspondant à l'ouverture du circuit. Ils sont destinés à ouvrir ou fermer un circuit de puissance en agissant sur un autre circuit parcouru par un faible courant, appelé circuit de commande.

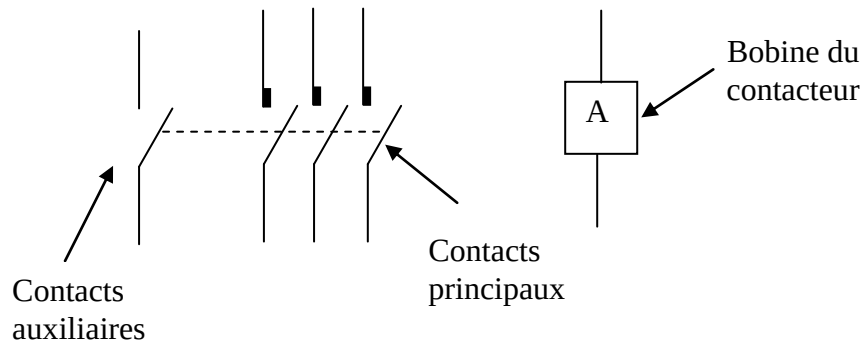


Fig.IV.11 Les symboles d'un contacteur

Le contacteur se compose de deux parties :

- **Le circuit de puissance :** Il est parcouru par le courant de charge. Il se constitue de contacts principaux, fixes et mobiles et de dispositif d'extinction de l'arc.
- **Le circuit de commande :** Alimenté par un faible courant, constitué de la bobine qui est l'organe moteur qui entraîne la fermeture des contacts, de contacts de commande ainsi que des contacts auxiliaires.

▪ Le principe de fonctionnement d'un contacteur :

Le circuit de commande du contacteur est alimenté à travers un transformateur abaisseur, il contient une bobine et deux boutons poussoir, bouton "Marche" qui est ouvert au repos et le bouton "Arrêt" qui au contraire est fermé au repos et un circuit ferromagnétique lui-même constitué de deux parties, l'une fixe et l'autre mobile. En fermant le contact "Marche" la bobine est traversée par un courant et un champ magnétique apparaît dans le circuit ferromagnétique, ce qui fera attirer l'autre partie mobile de ce dernier, et cela va entraîner les contacts principaux mobiles du contacteur et provoquera la fermeture du circuit.

La fermeture des contacts principaux est accompagnée par la fermeture des contacts auxiliaires, l'un de ces derniers est monté en parallèle avec le bouton "Marche" il est appelé le contact d'auto-maintien car il assure la continuité de l'alimentation de la bobine quand le bouton poussoir "Marche" regagne sa position d'ouverture, qui est la sienne au repos.

Pour la commande à l'ouverture, il suffit d'actionner dans le circuit de commande le bouton poussoir "Arrêt", ce dernier s'ouvre, la bobine sera "dés-alimentée", le champ magnétique va disparaître, les deux parties du circuit ferromagnétique se

relâchent, il y a un ressort de rappel qui fera remonter les contacts principaux mobiles dans le circuit de puissance ainsi que les contacts auxiliaires et le contacteur se retrouve ouvert.

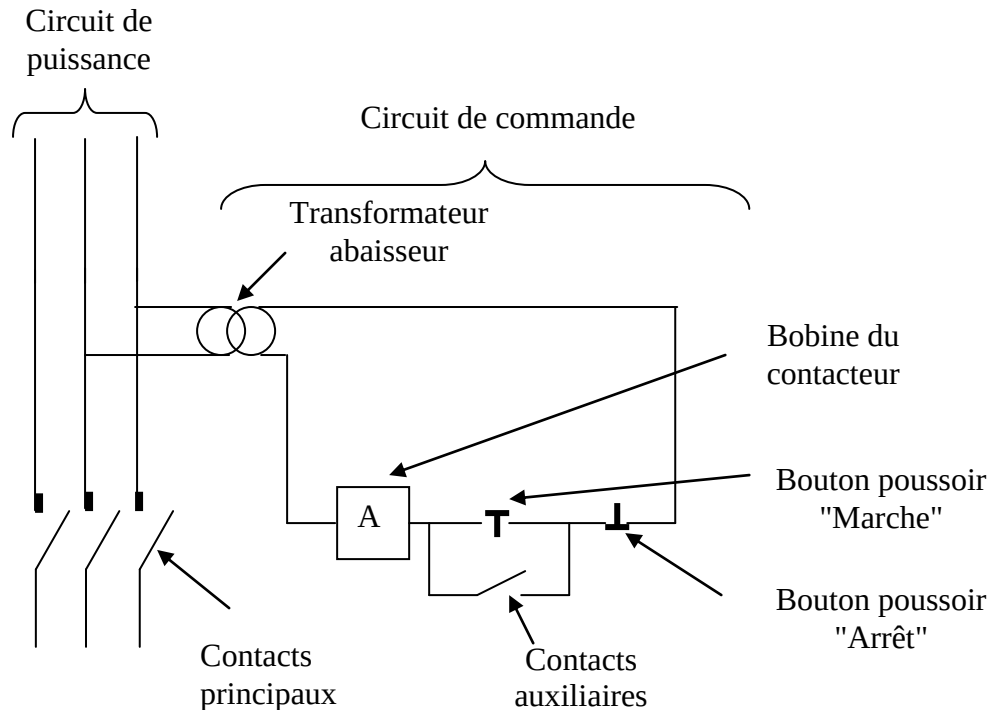


Fig.IV.12 Un contacteur triphasé avec le circuit de commande branché

Quand les contacteurs sont associés à des relais, on les appelle : Discontacteurs. Ce qui est très souvent le cas pour les besoins de protection. Selon le relais qui leur est associé, on trouve, des discontacteurs thermiques, magnétiques et magnétothermique.

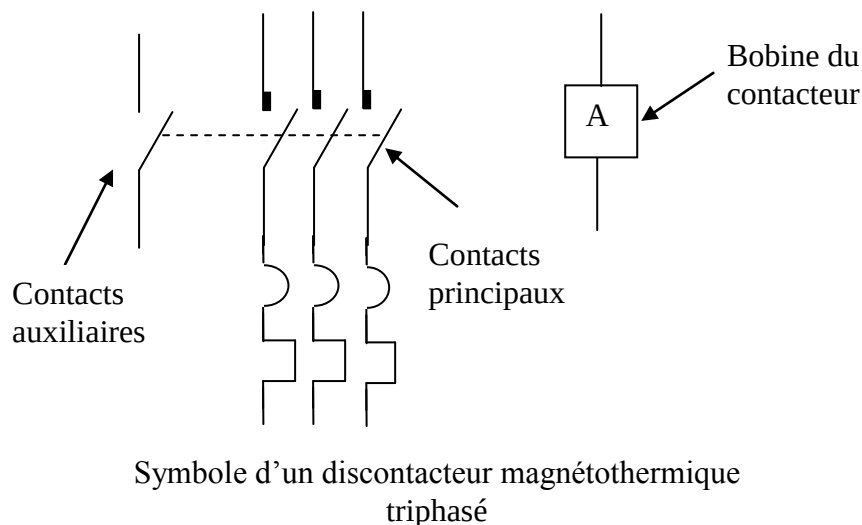


Fig.IV.13 Symbole d'un discontacteur magnétothermique triphasé

Les contacts des relais de protection sont insérés en série avec la bobine du contacteur dans le circuit de commande. L'action des relais consiste à ouvrir leur contact ce qui isolera le bobine, le champ magnétique disparaîtra et le contacteur s'ouvre.

V- La commande des machines électriques :

Les contacteurs sont très utilisés dans l'alimentation des machines électriques. On les utilise dans les alimentations à démarrage direct, démarrage étoile triangle et pour un double sens de rotation, comme on les retrouve aussi dans différents systèmes de commande de différentes machines faisant appel au verrouillage électrique.

V.1- Alimentation direct :

Pour l'alimentation des machines on fait appel à un sectionneur, qui peut être muni de fusibles, ainsi qu'un discontacteur, qui est un contacteur associé à un relais thermique ou magnétothermique.

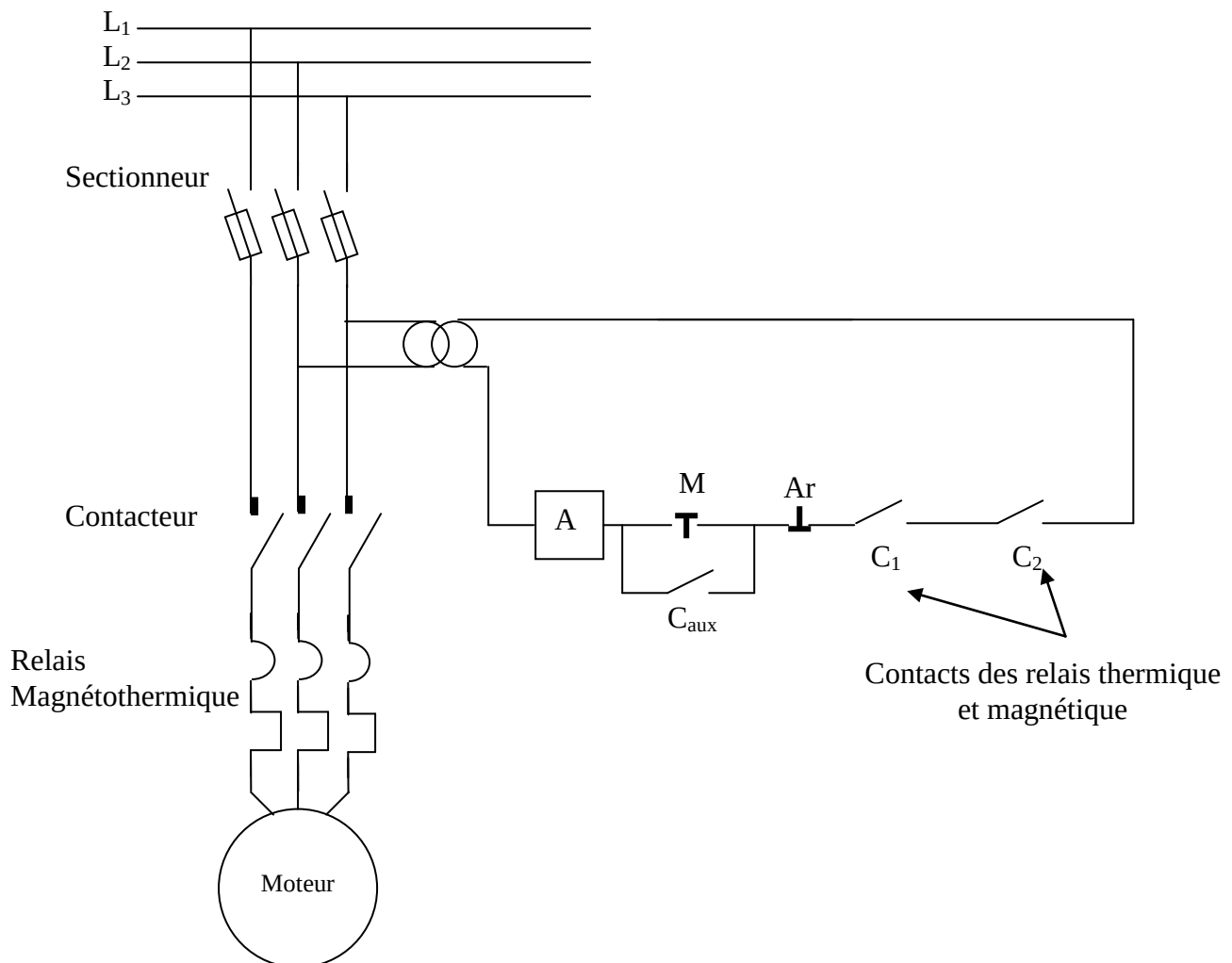


Fig.V.1 Schéma d'alimentation d'un moteur en utilisant, dans l'ordre, un sectionneur porteur de fusible et un discontacteur magnétothermique

- Le sectionneur est utilisé pour isoler la partie de l'installation en aval. Il ne manœuvre qu'à vide. Il est doté de fusibles.
- Le contacteur assure les manœuvres de fermeture et d'ouverture en charge. Il est commandé manuellement à travers les boutons poussoirs "Marche" et "Arrêt"
- Les relais magnétique et thermique ont deux contacts insérés dans le circuit de commande du contacteur. Dès qu'un défaut est détecté par l'un des deux relais son action est d'ouvrir un de ces deux contacts et le contacteur s'ouvre protégeant ainsi le moteur.

Dans cet exemple, le sectionneur n'est pas muni de contact de pré-coupure. Si c'est le cas et surtout quand l'alimentation du circuit de commande est indépendante ou tirée en amont du sectionneur, le contact de pré-coupure du sectionneur est inséré en série avec la bobine du contacteur et les contacts des relais.

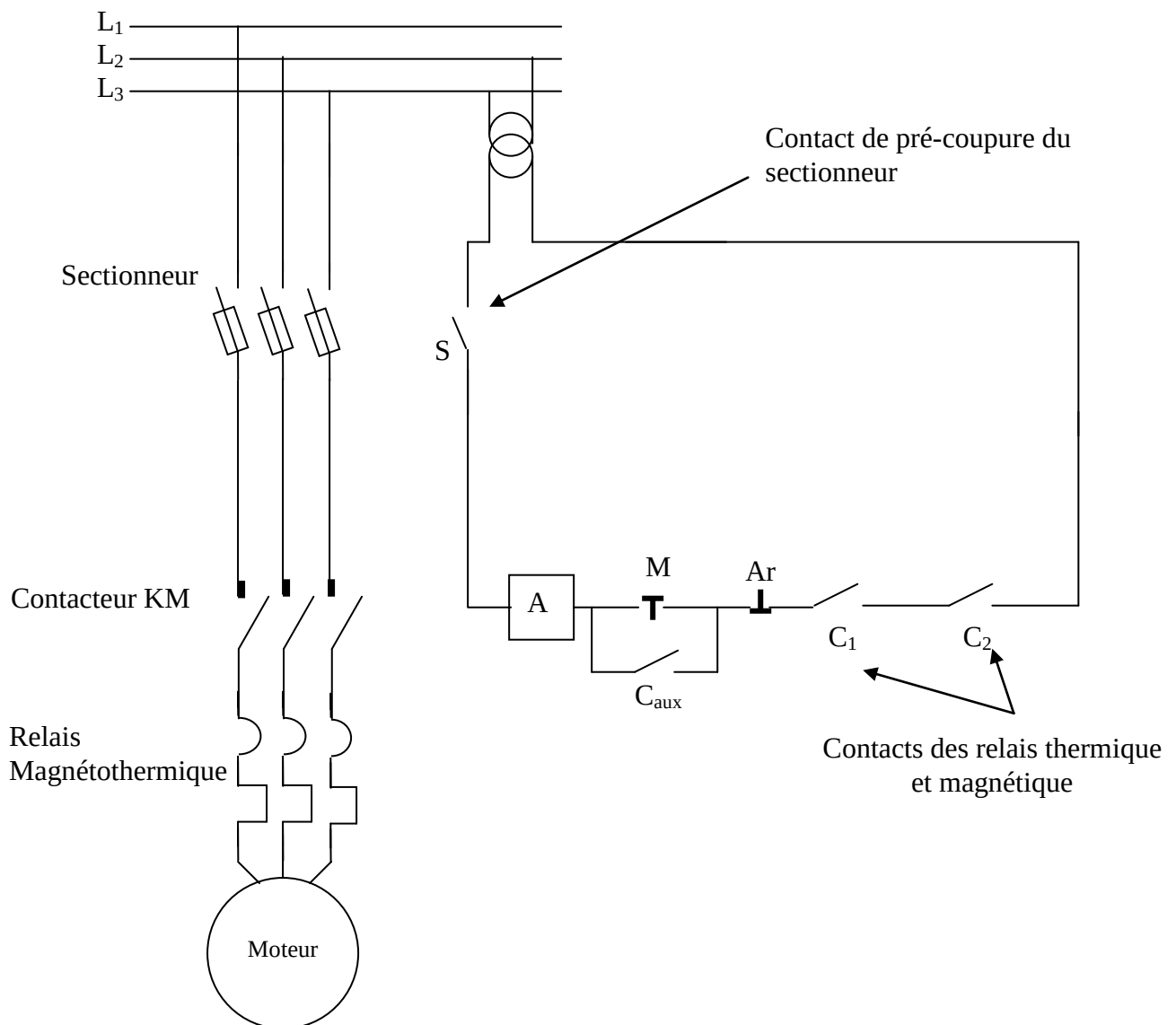


Fig.V.2 Schéma d'alimentation d'un moteur en utilisant un sectionneur porteur de fusible muni de contact de pré-coupure et un discontacteur magnétothermique

V.2- Démarrage Y- Δ (étoile triangle) :

Au démarrage des moteurs électrique, le courant d'appel est très important, ce qui provoque un sur échauffement des enroulements du moteur et des fois, quand le moteur est très puissant, la perturbation du réseau d'alimentation. Le démarrage étoile triangle revient à appliquer au moteur au moment de démarrage une tension simple au lieu d'une tension composée, une fois que la vitesse du moteur se stabilise on bascule très vite vers le branchement triangle.

La commande du démarrage étoile triangle fait appel a deux contacteurs commandés par un commutateur "C" avec position milieu ouverte.

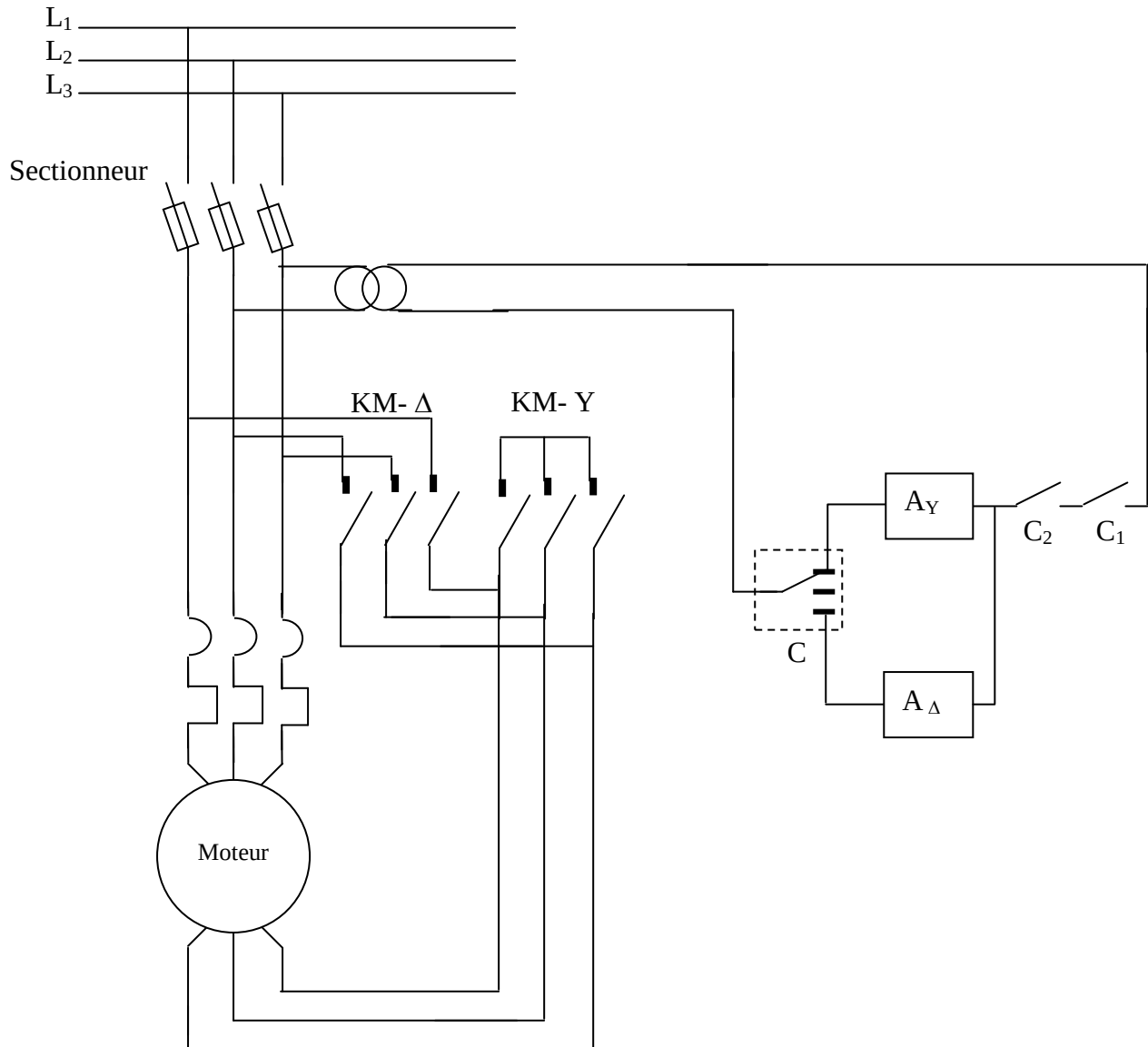


Fig.V.3 Schéma de commande pour démarrage Y- Δ (étoile triangle)

V.3- Inversement du sens de rotation des machines électriques :

L'inversion du sens de rotation est très répandue dans l'industrie. Pour la réaliser, il suffit de croiser deux lignes électriques alimentant le moteur. Pour une machine asynchrone triphasée, inverser son sens de rotation revient à inverser deux phases. Pour cela on fait appel un contacteur inverseur, qui se constitue de deux contacteurs avec leurs deux circuits de commandes en montage combiné.

Les contacteurs utilisés doivent avoir chacun deux contacts auxiliaires au moins, de telle sorte à ce que chacun aura un contact auxiliaire qui s'ouvre (C_{aux12} et C_{aux22}) et un autre qui se ferme (C_{aux11} et C_{aux21}) à la fermeture. Ceux qui se ferment à la fermeture (C_{aux11} et C_{aux21}) accompliront la fonction classique du contact d'auto-maintien, alors que ceux qui s'ouvrent à la fermeture (C_{aux12} et C_{aux22}) seront utilisés pour verrouiller l'autre contacteur étant chacun d'eux inséré en série avec la bobine du circuit de commande de l'autre contacteur.

Le verrouillage électrique réalisé empêche et protège contre l'apparition d'un court circuit à l'instant de l'inversement du sens de rotation en évitant la possibilité de la mise en fonctionnement des deux contacteurs en même temps.

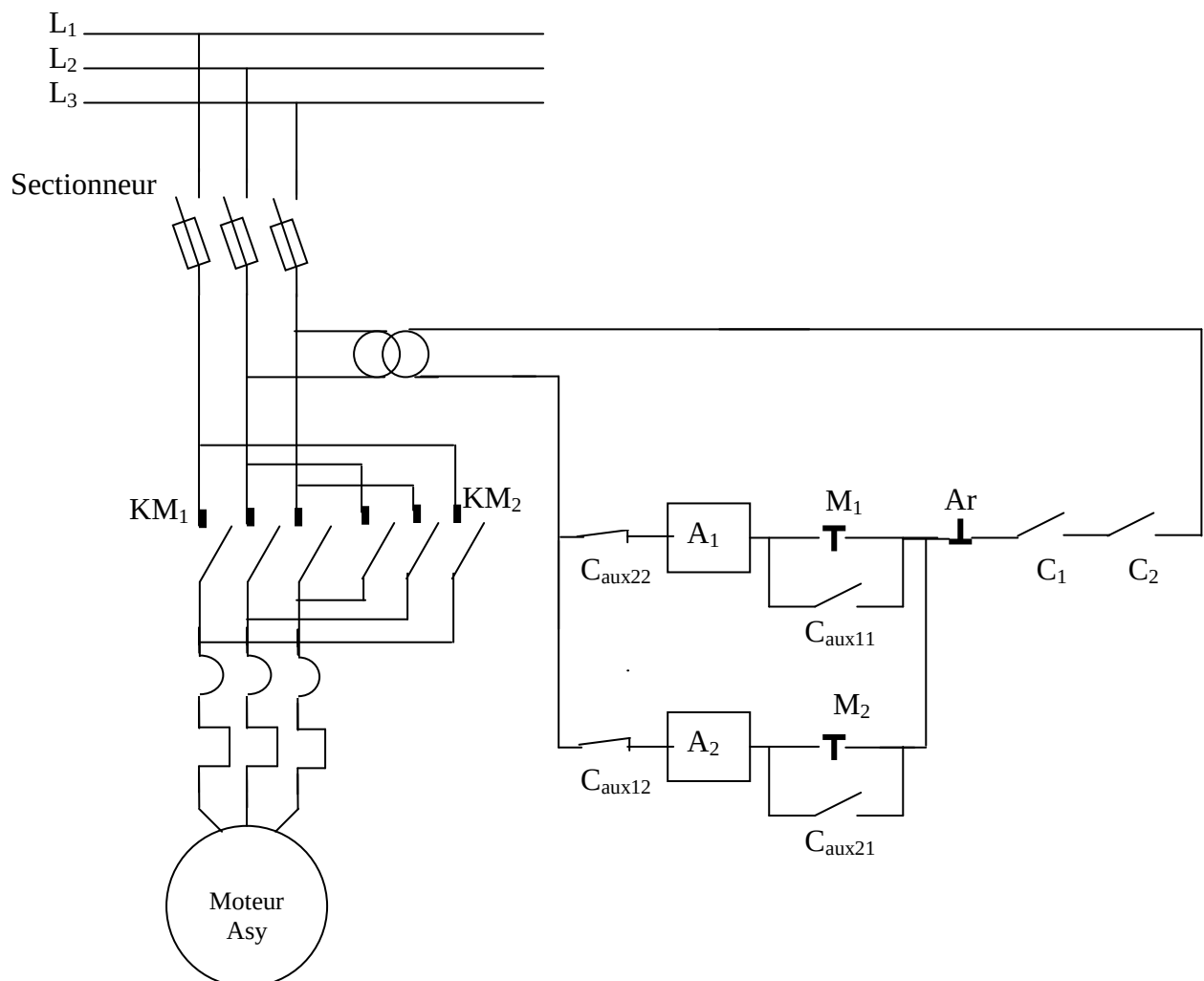


Fig.V.4 Schéma de commande pour l'inversement du sens de rotation des machines électriques

VI- Le choix de l'appareillage d'alimentation :

VI.1- Le choix des interrupteurs :

Parmi les interrupteurs utilisés on cite : Le sectionneur, le contacteur, les relais magnétique et thermique.

a. Le choix du sectionneur : Le choix du sectionneur est effectué selon :

- Nombre de pôles ;
- la tension nominale ;
- Courant nominal ;
- Contacts auxiliaires ;
- Nature de la commande ;
- Porteur de fusible ou pas ;
- Système de fixation.

b. Le choix d'un contacteur :

Le choix d'un contacteur est fonction de la nature et de la valeur de la tension du réseau, de la puissance installée, des caractéristiques de la charge, des exigences du service désiré.

- Tension nominale d'utilisation U_n : c'est la tension d'utilisation du contacteur.
- Courant nominal d'utilisation I_n : c'est le courant d'utilisation du contacteur.
- Courant nominal thermique I_{th} : c'est la valeur du courant servant de base aux conditions d'échauffement du circuit principal. Le contacteur doit être capable de supporter I_{th} de façon permanente, les contacts principaux étant fermés, sans que l'échauffement des différentes parties ne dépasse les limites fixées.
- Pouvoir de coupure : c'est la valeur efficace du courant maximal que le contacteur peut couper, sans usure exagérée des contacts. Le pouvoir de coupure dépend de la tension du réseau. Plus cette tension est faible, plus le pouvoir de coupure est grand.
- Pouvoir de fermeture : c'est la valeur efficace du courant maximal que le contacteur peut établir, sans soudure des contacts.
- Robustesse mécanique : c'est le nombre de cycles de manœuvres (fermeture + ouverture), à vide (sans courant dans les pôles), susceptible d'être effectué par le contacteur, sans aucun entretien.
- Endurance électrique : c'est le nombre de manœuvres maximal que peut effectuer le contacteur. Ce nombre dépend du service désiré.
- Facteur de marche : c'est le rapport entre la durée de passage du courant et la durée d'un cycle de manœuvre.

V.2- Le choix des protections :

Le choix des protections est effectué pour éviter les effets néfastes des défauts électriques qui se manifestent sous forme de surcharge du courant ou de déséquilibre.

V.2.1-Le choix et réglage du relais thermique : Tout équipement électrique est caractérisé par une caractéristique thermique qui définit le temps de fonctionnement maximum admissible pour chaque valeur de courant supérieur au courant nominal, comme il est caractérisé aussi par une valeur maximale admissible unique de courant. Le temps de fonctionnement admissible est de moins en moins important à chaque fois que le courant de surcharge devient de plus en plus grand.

Pour que le relais thermique puisse jouer son rôle, sa propre caractéristique thermique doit cerner d'un niveau plus bas celle de l'équipement à protéger. Cela permet d'obtenir l'action du relais avant que le temps admissible de fonctionnement pour l'équipement ne soit atteint, comme représenter sur la figure suivante :

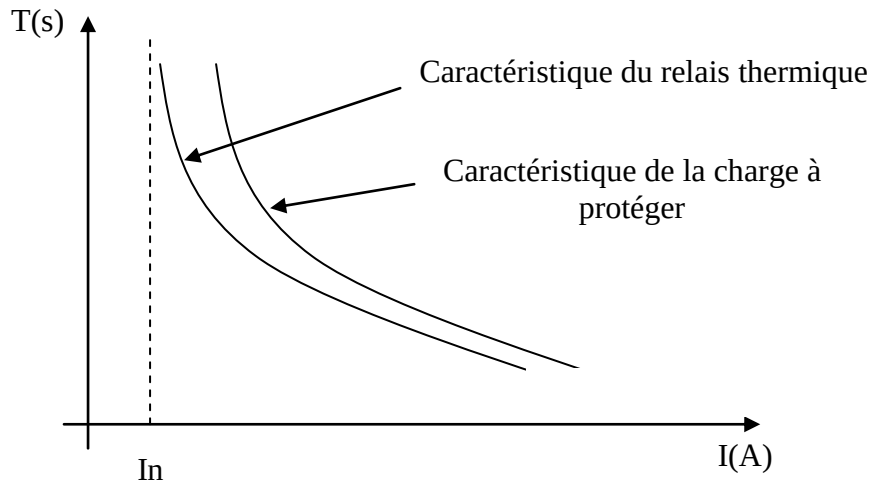


Fig.VI.1. Caractéristique thermique du relais et de la charge à protéger

Concernant le relais magnétique sa valeur de réglage est toujours inférieure à la valeur maximale admissible de courant dans le circuit.

V.2.2-Le principe de la sélectivité dans la protection : Dans une distribution radiale l'objectif de la sélectivité est de déconnecter du réseau le récepteur ou le départ en défaut, et seulement celui-ci, en maintenant sous tension la plus grande partie possible de l'installation. Elle permet ainsi d'allier sécurité et continuité de service, et facilite la localisation du défaut.