

Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Cours pour Master 1
Spécialité Réseaux Electriques

*Matière : Techniques de protection
des réseaux électriques*

Dr. BELOUCIF Faissel

Année universitaire 2019-2020

Chapitre I.

Généralités sur les perturbations et les systèmes de protection.

1. But de la protection.

Les buts visés par les dispositifs de protection sont multiples :

1. Assurer la protection des personnes contre les dangers électriques.
2. Éviter les détériorations de matériel.
3. Limiter les contraintes thermiques, diélectriques et mécaniques auxquelles sont soumis ces matériels.
4. Préserver la stabilité et la continuité de service du réseau.
5. Protéger les installations voisines (par exemple, réduire les tensions induites dans les circuits proches).

2. Etude des protections d'un réseau.

L'étude des protections d'un réseau se décompose en 2 étapes distinctes :

- ☛ la définition du système de protection, encore appelée plan de protection,
- ☛ la détermination des réglages de chaque unité de protection, encore appelée coordination des protections ou sélectivité.

3. Organisation d'un système de protection.

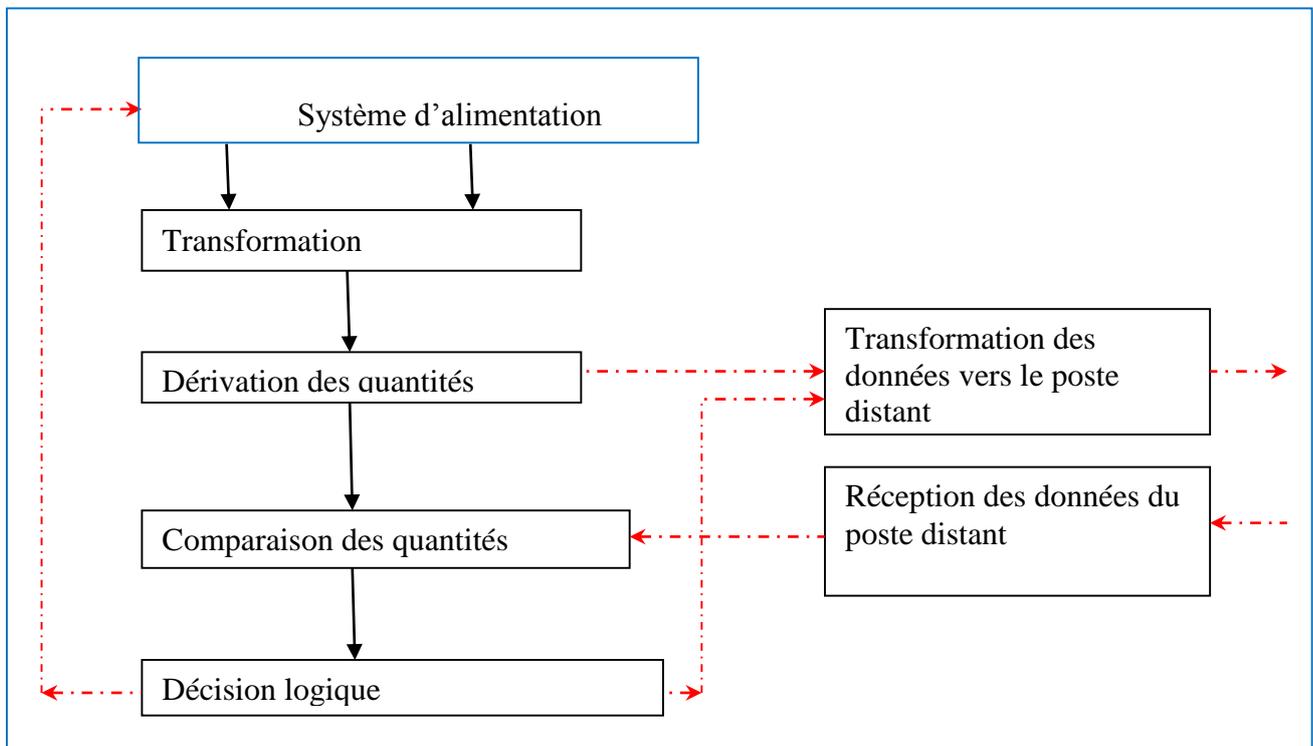


Fig. 1. Conditions d'un système de protection rapide

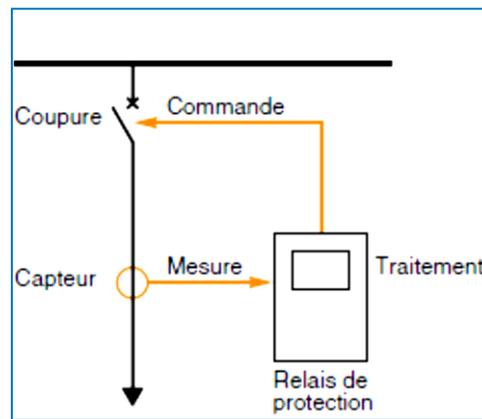


Fig.2. Chaîne de protection

Le système de protection se compose d'une chaîne constituée des éléments suivants.

- ☛ capteurs de mesure (courant et tension) fournissant les informations de mesure nécessaires à la détection des défauts,
- ☛ relais de protection, chargés de la surveillance permanente de l'état électrique du réseau, jusqu'à l'élaboration des ordres d'élimination des parties défectueuses, et leur commande par le circuit de déclenchement,
- ☛ organes de coupure dans leur fonction d'élimination de défaut; disjoncteurs, interrupteurs-fusibles, contacteurs-fusibles.

4. Architecture des réseaux électriques.

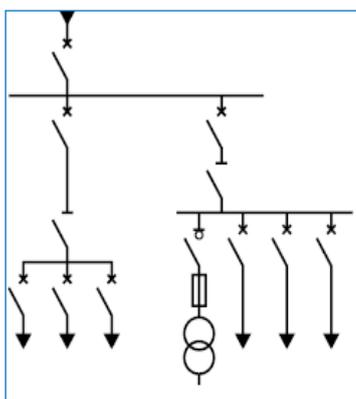
4.1 Structures.

Différentes structures utilisées pour la conception des réseaux électriques, dont la complexité détermine la disponibilité de l'énergie électrique et le coût d'investissement.

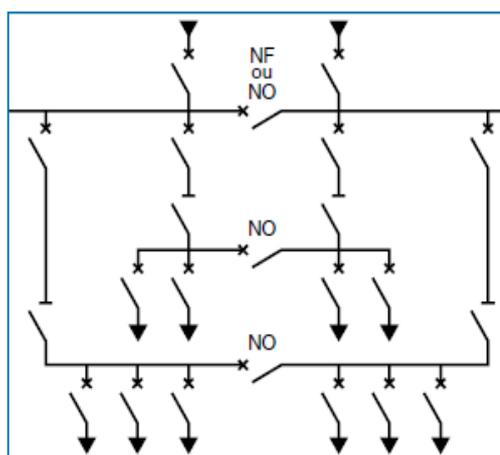
On distingue essentiellement les types suivants :

- les réseaux à architecture radiale
 - en simple antenne,
 - en double antenne,

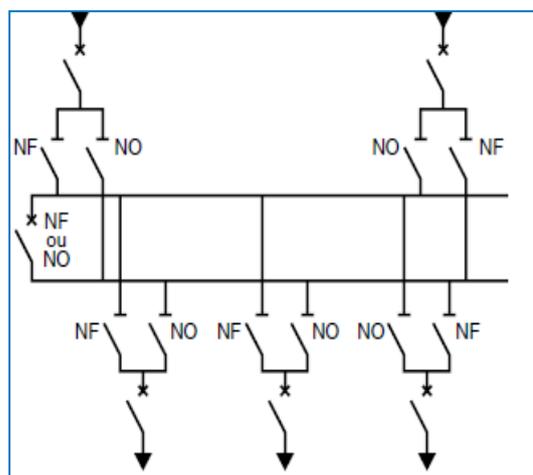
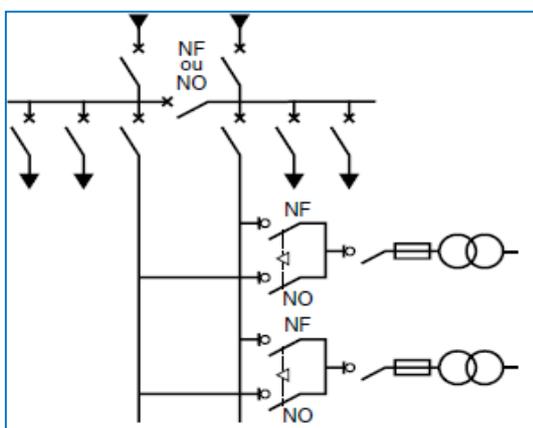
- en double dérivation,
- en double alimentation avec double jeu de barres.
- les réseaux bouclés
 - en boucle ouverte
 - en boucle fermée
- les réseaux incluant une production interne d'énergie
 - avec groupes de production locale.
 - avec groupes de remplacement.



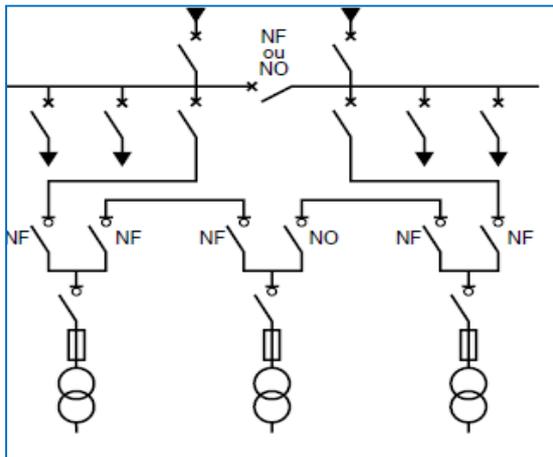
a. Simple antenne



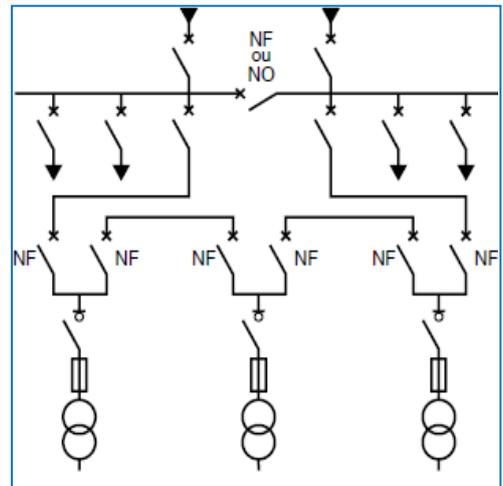
b. Double antenne



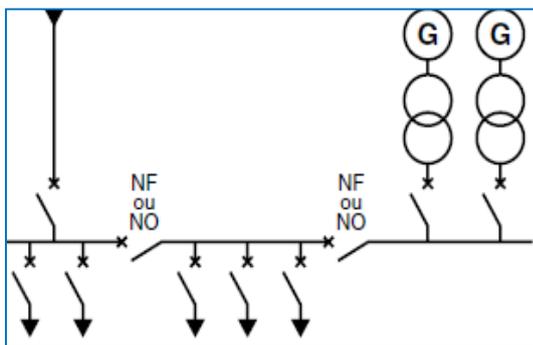
c. Double dérivation



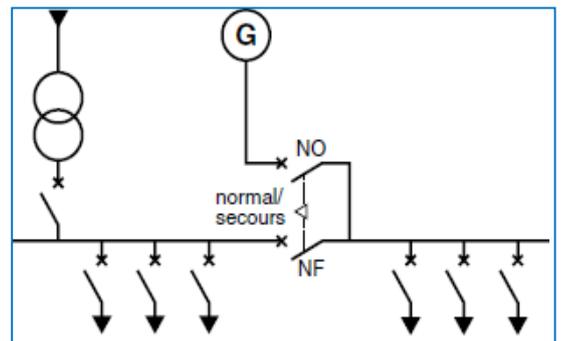
d. Double jeu de barres



e. Boucle ouverte



f. Boucle fermée



g. Production locale

h. Production de remplacement (secours)

Fig.3. Différentes structures des réseaux électriques

Remarque :

NF : normalement fermé

NO : normalement ouvert

Les autres appareils de coupure sans légende sont normalement fermés.

4.2 Différents types d'alimentation.

4.2.1 Alimentation en simple dérivation.

Dans ce cas chaque poste de transformation est alimenté en « simple dérivation » sur une artère principale ou secondaire.

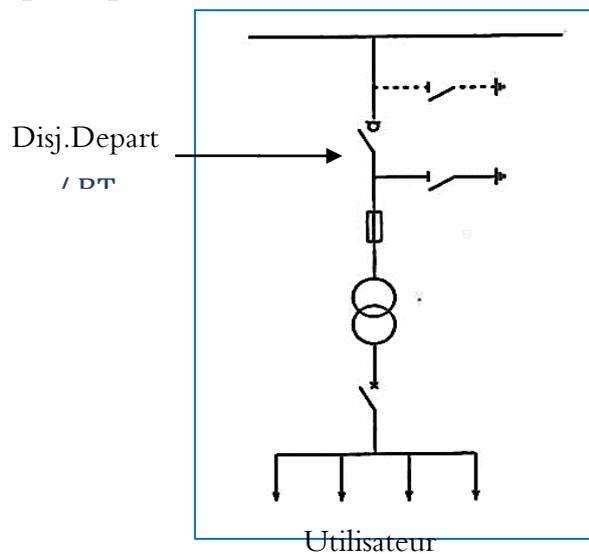


Fig.4. Schéma d'une simple alimentation

Ce type d'alimentation est surtout utilisée distribution rurale, et en aérien.

La seule protection étant le disjoncteur de départ du poste source, tout défaut sur le réseau provoque la coupure de tous les abonnés concernés par le départ du poste source.

4.2.2 Alimentation en coupure d'artère.

Tous les postes HTA/BT sont branchés en dérivation sur une boucle ouverte en un point (dit point de coupure) proche de son milieu. Tous les appareils de coupure de l'artère, sauf un, sont donc fermés.

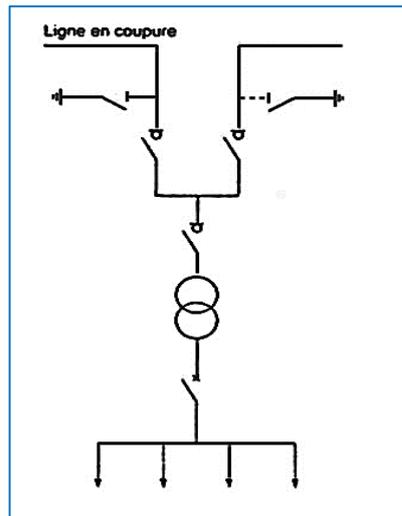


Fig.5. Schéma d'une alimentation en coupure d'artère

Ce type de réseau est surtout réalisé en souterrain et, en général, en milieu urbain.

En cas de défaut sur une partie de la boucle, on peut toujours alimenter tous les postes en ouvrant la boucle à l'endroit du défaut.

4.2.3 Alimentation en double dérivation.

Dans ce cas chaque poste est alimenté par deux câbles avec permutation automatique en cas de manque de tension sur l'une des deux arrivées.

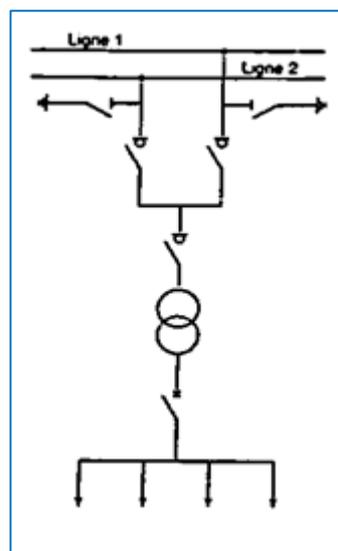


Fig.6. Schéma d'une alimentation en double dérivation.

Cette disposition Les dispositions en coupure d'artère et en double Dérivation sont employées pour les réseaux souterrains qui ont une continuité bien meilleure que les réseaux aériens

5. Différentes perturbations.

En permanence des perturbations importantes affectent la qualité de l'alimentation. Le distributeur à pour obligation d'assurer un service de qualité, concernant notamment :

- la tenue de la fréquence et de la tension
- la continuité de la fourniture d'énergie.

5.1 Qualité en régime normal.

5.1.1 Maintien de la fréquence à sa valeur nominale.

Théoriquement la qualité dépend de l'équilibre permanent entre la puissance fournie par les centrales et la puissance, constamment variable, appelée par la clientèle. D'où une incitation à l'étalement de la charge pour éviter les pointes.

$$f = 50 \text{ Hz} \pm 0,05 \text{ Hz}$$

5.1.2 Tenue de la tension en HTA.

Les variations de la tension ont surtout pour origine les chutes de tensions sur les réseaux et dépendent essentiellement de l'énergie réactive transportée. D'où une incitation à limiter l'énergie réactive appelée.

$$\pm 7 \% \text{ pour } 5 \text{ kV} < U_n < 33 \text{ kV}$$

5.2 Qualité en régimes perturbés.

La qualité de l'alimentation est affectée principalement par :

- les coupures longues
- les coupures brèves
- les perturbations électriques

5.2.1 Les coupures longues.

Il est difficile de se protéger contre les coupures longues dues à la production et aux réseaux d'alimentation. Le choix du type d'alimentation permet d'en limiter les conséquences.

De plus, la généralisation des travaux sous tension permet de limiter les coupures, notamment pour extension d'ouvrage ou raccordement de clients.

Néanmoins, de nombreux incidents provoquent encore des coupures longues :

- les perturbations atmosphériques graves
- les fausses manœuvres
- les défaillances du matériel
- les dégradations.

5.2.2 Les coupures brèves.

Elles sont dues essentiellement aux perturbations atmosphériques qui provoquent l'ouverture des disjoncteurs HT, dont le réenclenchement est assuré par un automate, selon une procédure préétablie qui tient compte de l'importance du défaut.

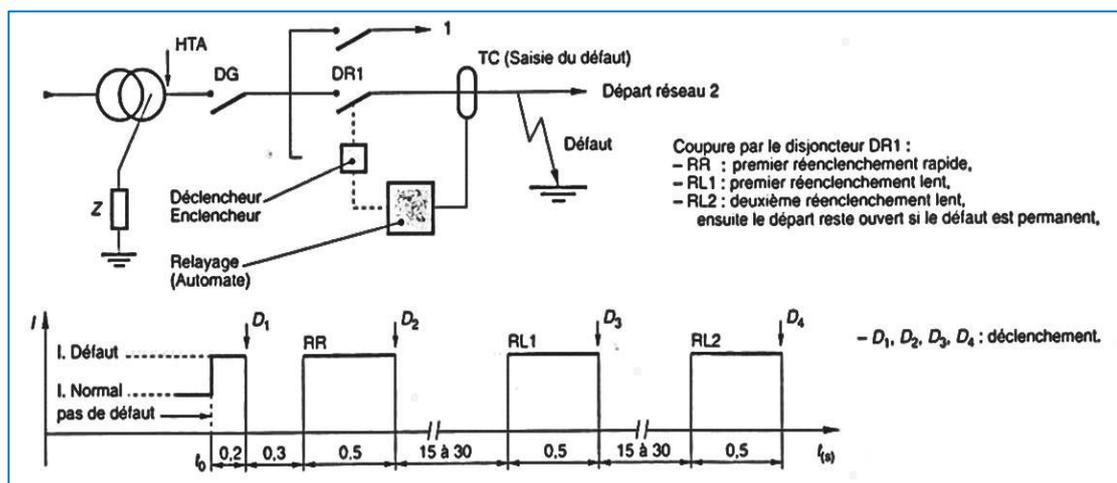


Fig.7. Sélectivité chronométrique d'un système de protection.

5.3 Variation des grandeurs électriques.

Elles sont généralement définies par :

- ☛ **Surintensité**
- ☛ **Surtension**

5.3.1. Surintensité.

a- Courant de Court-circuit.

Le courant de court-circuit, de nature instantanée est une surintensité produite par un défaut d'impédance, dont la valeur devient négligeable entre deux points du même réseau (circuit), ce défaut peut être détecté par :

- Relais électromagnétique
- Fusible

Dans les installations électriques différents court-circuit peuvent se produire. Ils sont principalement caractérisés par :

- leurs durées : auto-extincteur, fugitif...
- leurs origines:
 - ✓ mécaniques (rupture de conducteurs, liaison électrique accidentelle entre deux conducteurs par un corps étranger conducteur tel que outils ou animaux),
 - ✓ surtensions électriques d'origine interne ou atmosphérique,
 - ✓ ou à la suite d'une dégradation de l'isolement, consécutive à la chaleur, l'humidité ou une ambiance corrosive ;
- leurs localisations : interne ou externe à une machine ou à un tableau électrique

les court-circuits peuvent être :

- ☛ monophasés : 80 % des cas ;
- ☛ biphasés : 15 % des cas. Ces défauts dégènèrent souvent en défauts triphasés ;

↗ triphasés : 5 % seulement dès l'origine.

▪ **Cause de court-circuit :**

- Rupture de conducteurs
- Coup de foudre
- Contact intempestif
- Fausse manœuvre

▪ **Conséquences engendrées par c-c :**

Généralement sont regroupés dans

- Déséquilibre
- Chute de tension
- Chute de fréquence
- Échauffement
- Perte de synchronisme

Au point de défaut

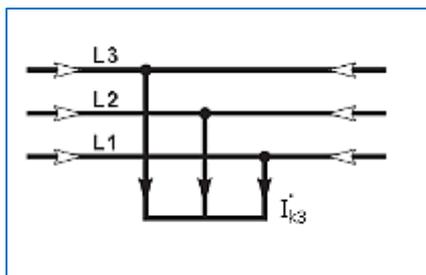
◆ la présence d'arcs de défaut

- ✓ avec détérioration des isolants
- ✓ fusion des conducteurs
- ✓ incendie et danger pour personnes

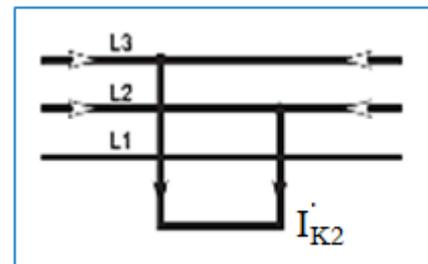
◆ pour le circuit défectueux :

- ✓ les efforts électrodynamiques, avec :
 - ↗ déformation des JdB (jeux de barres),
 - ↗ arrachement des câbles

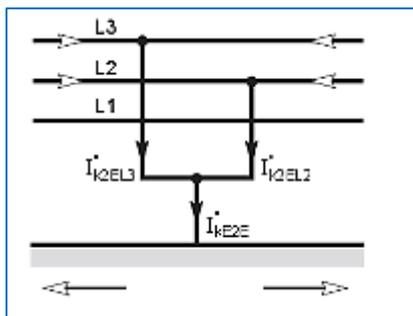
- ◆ sur échauffement par augmentation des pertes joules, avec risque de détérioration des isolants
- ◆ l'instabilité dynamique et/ou la perte de synchronisme des machines
- ◆ les perturbations dans les circuits de contrôle et de commande,



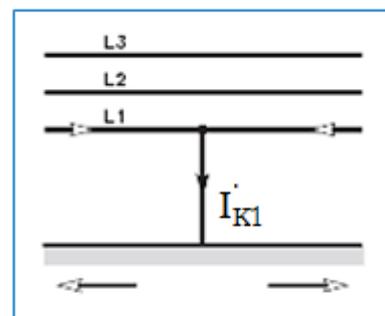
a. Court-circuit triphasé



b. Court-circuit biphasé, non à la terre



c. Court-circuit biphasé, à la terre



d. Court-circuit monophasé phase-terre

Fig.8. Différents cas de court-circuit.

Les courants de court-circuit peuvent être calculés par les expressions suivantes.

$$I_{cc3} = \frac{U}{\sqrt{3} * Z_l} \quad , \quad I_{cc2} = \frac{U}{2 * Z_l} \quad , \quad I_{cc1} = \frac{U}{Z_l + Z_n} \quad , \quad I_{cc0} = \frac{U}{Z_l + Z_{pE}}$$

Avec ; V1, V2 et V3 représentent les tensions simples du réseau côté BT.

Z_l ; représente l'impédance par phase en amont du défaut.

Z_n ; représente l'impédance du neutre.

Z_{pE} ; représente l'impédance du conducteur de protection équipotentielle.

- ✎ à partir des formules ci-dessus, on remarque que le courant de court-circuit, le plus néfaste pour l'installation, a lieu lors d'un court-circuit entre les 3 phases.

b. Courant de surcharge.

Le courant de surcharge est une surintensité de nature progressive qui se produit dans un circuit sain suite à une augmentation de la charge, ce type de défaut doit être détecté par :

- Relais thermique
- Fusible

5.3.2. Surtension.

a. Flicker

Signifiant papillotement, le flicker est une perturbation électrique définie par des variations de tension périodiques et rapides (fluctuation de tension).

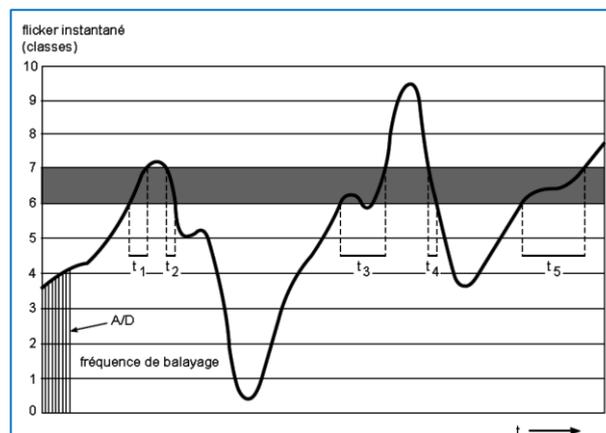


Fig.9. Allure d'une variation rapide de tension.

Elles sont à l'origine de nombreux phénomènes tel que :

- ✎ Soit par la variation fluctuante de puissance appelée par divers récepteurs (fours à arc, soudeuses...).

- ⚡ Soit par la mise sous et hors tension de charges importantes : démarrage moteurs, manœuvre de batteries de condensateurs en gradins, etc...
- ⚡ Les sources de ces fluctuations sont les équipements électriques dont le fonctionnement nécessite d'importantes variations cycliques de courant qui, parcourant l'impédance du réseau (R, X), provoquent les variations de tension ΔU .

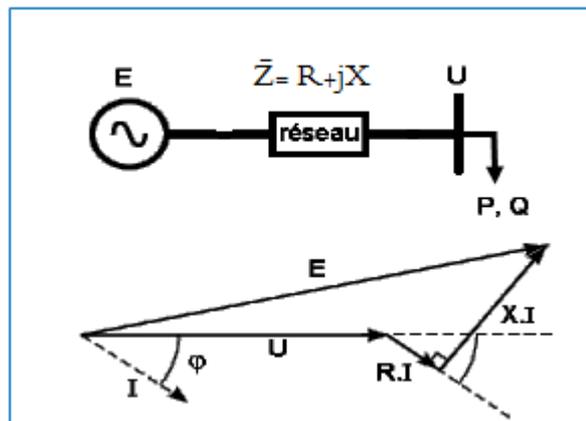


Fig.10. Diagramme vectoriel d'une variation de tension.

On définit :

U ; tension nominale du réseau (de fonctionnement)

E ; tension à vide du réseau

$\Delta U = E - U$; Chute de tension

P ; puissance active de la charge sous la tension nominale U

Q ; puissance réactive de la charge sous la tension nominale U

$\cos \Phi$; Facteur de puissance de la charge et I ; le courant nominal de la charge

S_{cc} ; puissance de court-circuit du réseau amont

R ; résistance totale du réseau amont et X ; réactance totale du réseau amont

D'après l'expression de la chute de tension dans un tronçon du réseau électrique on peut écrire;

$$\Delta U = E - U = I.Z = R.I.\cos\Phi + X.I.\sin\Phi$$

Plus on peut exprimer les puissances comme suite.

$P = U.I.\cos\Phi$ et $Q = U.I.\sin\Phi$; Ce qui donne après le remplacement de P et Q dans l'équation précédente ;

l'expression suivante ;
$$\Delta U = \frac{R.P + X.Q}{U}$$

et en valeur relative par rapport à la tension nominale U , on obtient ;

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{R.P + X.Q}{U^2}$$

Remarque

En HT, la résistance $R \ll X$ la dernière équation sera réduite à :

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{X.Q}{U^2}$$

; C'est la variation de la puissance réactive Q qui est prépondérante sur

la chute de tension, donc elle doit être contrôlée dans chaque point de raccordement des consommateurs (jeux de barre);

En BT, R n'est pas négligeable : il faut alors agir sur les puissances active et réactive, P et Q .

Les fluctuations de tension telles que décrites ci-dessus sont analysables avec un appareil de mesure dit le **flickermètre**.

b. Baisse ou manque de tension.

Toute tension au-dessous de la tension nominale dans un point quelconque d'un réseau causée généralement par chute de tension, trop importante provoquant ainsi un déséquilibre

Conséquences : Mauvais fonctionnement des récepteurs

Moyens de protection : Relais à minimum de tension, alimentation autonome.

c. Surtensions transitoires.

Elles sont deux types ; surtension transitoires internes qui sont à l'origine de toute manœuvre ou dégradations, interruptions et arrêts des outils de production. Par contre les surtensions externes sont à l'origine de l'apparition de coup de foudre sur les lignes aériennes.

- ↳ Réseau électrique en marche à vide (effet de feranti).
- ↳ Coups de foudre.
- ↳ contact entre HTA et BTA.
- ↳ Rupture de phase.

Conséquences : Claquage des isolants avec pour conséquence des courts-circuits éventuels.

Moyens de protection : limiteur de surtension, relais de surtension, parafoudre.

Remarque:

Il existe aussi d'autres perturbations considérées importantes dans les systèmes électriques, tel que les harmoniques et les retours de puissance, surtout dans les réseaux bouclés et les réseaux alimentés de plusieurs cotés.

6. Nature d'un défaut

6.1 Défaut fugitif

Ce défaut nécessite une coupure très brève du réseau d'alimentation de l'ordre de quelques dixièmes de seconde.

6.2 Défaut permanent

Ce défaut provoque un déclenchement définitif de l'élément de protection. Il nécessite l'intervention du personnel d'exploitation.

6.3 Défaut auto- extincteur

C'est le défaut qui disparut spontanément en des temps très courts sans qu'il provoque le fonctionnement de la protection.

6.4 Défauts semi- permanent

Ce défaut exige une ou plusieurs coupures relativement longues de l'ordre de quelques dizaines de secondes. Il ne nécessite plus l'intervention du personnel d'exploitation.

7. Les effets des défauts électriques.

Les conséquences d'un défaut électrique sont multiples.

- ✓ En aval du défaut : le réseau mis hors tension entraîne un arrêt partiel
- ✓ Le siège du défaut est souvent endommagé, d'où démontage, réparation, remplacement, retour en usine, expertise... ;
- ✓ Pendant la durée du défaut, le personnel est confronté à un risque d'électrisation, de brûlures (effets thermiques), voire même de traumatismes (projection ou chute).

Des conséquences peuvent être ressenties également sur les parties saines du réseau, par exemple lors d'un court-circuit :

- ✦ Chute de tension préjudiciable aux accrochages électriques, aux automates et équipements informatiques.
- ✦ Perte de stabilité des machines tournantes qui peut, même après élimination du défaut, s'aggraver jusqu'à entraîner l'effondrement total de la distribution et des sources de secours prévues pour assurer la continuité de l'alimentation.

Dans presque tous les cas, un défaut provoque une interruption d'alimentation et de production. Interruption qui, du fait des contraintes économiques, est de moins en moins acceptable. L'arrêt d'exploitation peut cependant être circonscrit à une zone du réseau selon le lieu du défaut.

8. Caractéristiques d'un système de protection.

Pendant la conception d'un système de protection, les objectifs de Fiabilité, Sécurité, Disponibilité et maintenabilité doivent être pris en compte.

- ✓ **Disponibilité** : est la probabilité pour une protection d'être en état d'accomplir sa fonction, dans des conditions données, à un instant donné.
- ✓ **Sécurité** : est la probabilité pour une protection de ne pas avoir de fonctionnement intempestif, dans des conditions données, pour un intervalle de temps donné.

- ✓ **Fiabilité** : est la probabilité pour que la protection puisse accomplir sa fonction dans des conditions données pour un intervalle de temps donné c'est-à-dire principalement l'aptitude à déclencher quand il le faut et l'aptitude à ne pas déclencher intempestivement.
- ✓ **Maintenabilité** : est la probabilité pour qu'une opération donnée de maintenance active puisse être.
- ✓ **Sensibilité** : capacité de la protection de pouvoir réagir pendant le régime minimal de charge de réseau, c a d quand la valeur réelle de la grandeur à l'action de laquelle doit réagir la protection est minimale.

Pour la protection ampèremétrique cette caractéristique peut être définie par le coefficient de sensibilité (retour).

$$K_{sen} = K_{ret.} = \frac{I_{min} = I_{ret}}{I_f}$$

Ou I_{min} ; est le courant minimal qui n'entraîne pas le fonctionnement de la protection.

I_f courant qui provoque le fonctionnement de la protection.

- ✓ **Sélectivité** : propriété de la protection de déterminer l'élément en défaut et de le débrancher ou de le signaler lui-même.

Chapitre II.

Composants d'un système de protection

1. Transformateurs de courant :

1.6 Utilisation des TCs :

Ils sont utilisés selon des schémas différents

1.6.1- Protection à maximum de courant d'intensité.

Le relais utilisé directement l'information c'est le courant secondaire du TC pour détecter le courant de défaut en aval du disjoncteur.

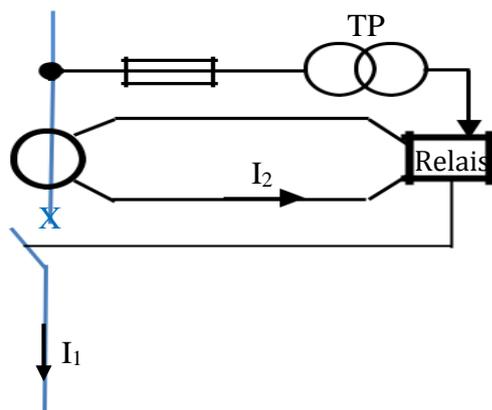


Fig.1.6.a

1.6.2- Protection différentielle.

La différence des courants secondaires détectée

$I_r = I_2 - I_2^-$, par le relais RC et délivrée par deux TCs, un en aval du réseau et l'autre en amont d'une partie du réseau à surveiller lorsque cette différence de courant devient supérieure à la valeur seuil de réglage de la protection pour tous courant de défaut interne à cette partie, la protection réagit par le déclenchement du disjoncteur placé en aval.

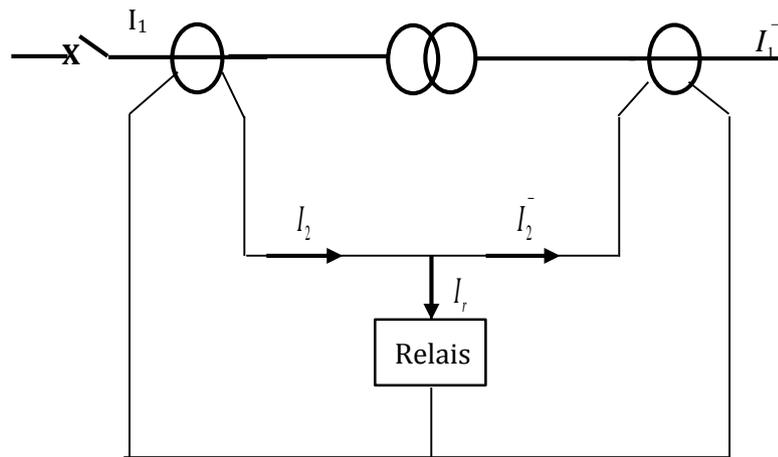


Fig.1.6.b

Avec ; $I_r = I_{diff} = I_2 - I_2^{-}$

1.6.3-Protection homopolaire.

L'emploi d'un TC dit sommaire ou trois TCs, dont le courant homopolaire I_0 du courant triphasé qui apparait lorsqu'un court-circuit phase-terre est survenu. Tout défaut entraine le déséquilibre du système triphasé peut produit un courant homopolaire I_0 lorsqu'il dépasse le seuil de réglage de la protection qui envoie un ordre au disjoncteur pour mettre le réseau hors tension. Figure.1.6.c

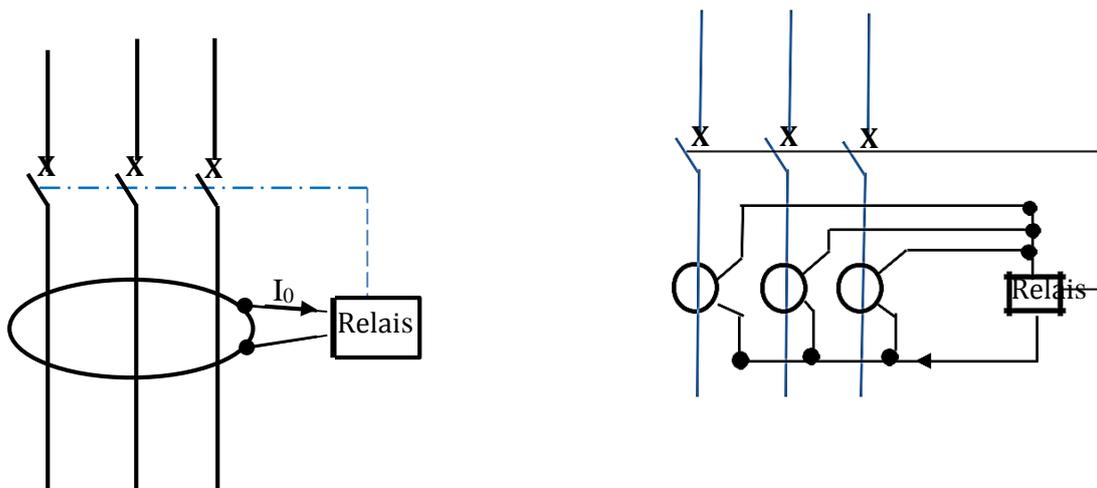


Fig.1.6.c

2 . Transformateur de tension (de potentiel TP)

2.1. Rôle du TP

C'est analogue de transformateur de puissance, permet de mesurer la tension du primaire coté HT avec une précision et sans intervention sur l'installation HT (sans risque) donc on obtient une isolation galvanique par un Transformateur de potentiel, son rôle est l'isolation et la sécurité de l'utilisateur et le matériel contre les danger de haute tension, cependant la tension obtenue sur son secondaire est généralement de 100 V ou 110 V.

2.2. Rapport du TP

C'est fraction entre la tension primaire et la tension secondaire du transformateur de potentiel,

$$K_{TP} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_P}{U_S} ; \text{ ou } U_1; \text{ la tension primaire et } U_2; \text{ la tension secondaire du TP}$$

$$\text{Exemple : } K_{TP} = \frac{24000}{\sqrt{3}} : \frac{100}{\sqrt{3}}$$

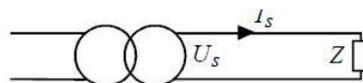
$$\text{On peut écrire donc ; } U_{pn} = \frac{24000}{\sqrt{3}} \text{ et } U_{sn} = \frac{100}{\sqrt{3}}$$

Autres écritures du TP ;

$$- \frac{3000}{\sqrt{3}} / \frac{100}{\sqrt{3}} \text{ avec } U_P = \frac{U}{\sqrt{3}}$$

$$- 3000/100 \text{ Avec } U_P = U$$

2.3. Symbole



Z est l'impédance du TP et la puissance de précision du TP peut être exprimée par ;

$$P = \frac{U_s^2}{Z} ; \text{ Avec } U_s \text{ est la tension de sortie (secondaire)}$$

$$I_s = \frac{U_s}{Z} ; \text{ Est le courant délivré sur son secondaire}$$

La tension du secondaire est imposé par le primaire sont diminués, lorsque Z est augmenté la puissance et le courant P et I_s , mais lorsque l'impédance est diminué le courant du secondaire est augmenté brusquement qui peut détériorer le TP, cependant pour avoir une bonne image et précise au primaire (erreur st minimale)il ne faut jamais mettre le TP en court-circuit.

2.4. Erreur du TP

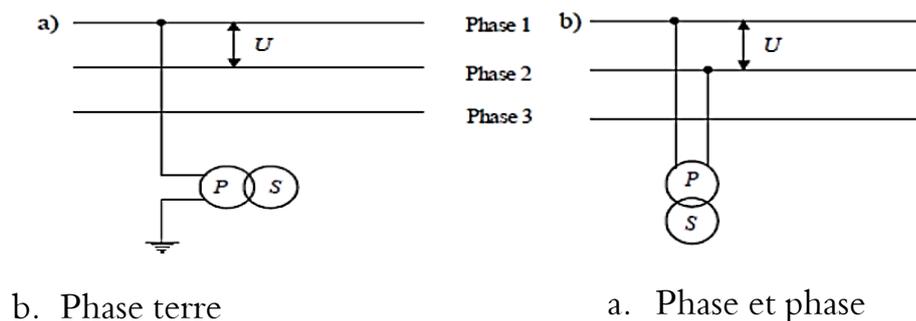
L'erreur du TP est donnée par l'expression.

$$\varepsilon_v = \frac{K_n \cdot U_s - U_p}{U_p} \cdot 100$$

Avec ; U_p tension primaire U_s ; tension secondaire.

2.5. Connexions du TP

Il existe deux connexions selon leur branchement, entre phase et neutre ou entre phase et phase.



a) entre phase et neutre (terre), exemple $K_{TP} = \frac{30000}{\sqrt{3}} : \frac{110}{\sqrt{3}}$

b) entre phase et phase, exemple $K_{TP} = 3000 : 110$

Exemple.

Un TP est donné par cette caractéristique

$$\frac{20000}{\sqrt{3}} : \frac{110}{\sqrt{3}} \text{ 100 VA Cl1}$$

$$U_P = \frac{20000}{\sqrt{3}} \text{ V} \quad \text{et} \quad U_S = \frac{110}{\sqrt{3}} \text{ V}$$

Sa puissance de précision est de 100 VA

Classe de précision est 1

Puissance de précision est de 100 VA Classe de précision 1.

Chapitre III.

Fonctions et principes de protection

1. Différentes fonctions de protection et leurs codes

Selon les normes CEI : comité électrotechnique international

ANSI : American standard information

Les protections ont principalement pour but d'éviter la détérioration, des principaux éléments constituant le système énergétique tel qu'alternateurs, transformateurs, jeu de barres. Réseaux.) des conséquences de défaut peuvent chiffrer, non seulement sur le côté matériel mais aussi sur le côté vie humaine, c'est pourquoi les systèmes de protection comportent des dispositifs de secours, qui en cas de mauvais fonctionnement des équipements devant intervenir pour assurer la mise hors tension de l'ouvrage partie défectueuse.

Il existe plusieurs fonctions de protection

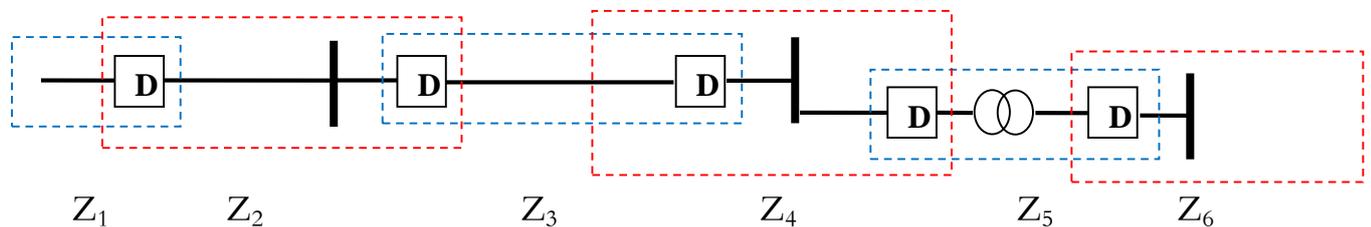
- ☞ Protection contre la surcharge à maximum de courant leur code **50/51** (défaut entre phase c-c)
- ☞ Protection contre les variations de tension
 - à minimum de tension **27**
 - à maximum de tension **59**

Pour pallier le défaut de chute tension baisse de tension, on utilise la fonction **27**, et pour éliminer tout défaut de surtension des automatismes gérés par le régulateur des tensions et utilise la fonction **59** légèrement temporisée.

- ☞ Contre le retour de puissance directionnel de puissance **32**.
- ☞ Protection contrôle la direction du courant :
 - **67** directionnel de courant
 - **67N** directionnel de terre
- ☞ Protection à distance (minimum d'impédance) leur code **21**
- ☞ Protection qui contrôle la fréquence des générateurs

- 81 < à minimum de fréquence
- 81 > à maximum de fréquence
- ☞ Protection différentielle 87
- ☞ Protection contre la perte de synchronisme 78
- ☞ Protection de surcharge (image thermique 49).

2. Zones de protection



- le chevauchement des zones de protection est indiqué par ligne pointillée fermée.
- chaque zone de protection est composée de deux disjoncteurs
- quand un défaut est apparait dans une zone, de protection la protection de la zone déclenche fonctionne et isole la partie (zone défectueuse) au reste du réseau.
- le chevauchement des zones garantit qu'aucune partie du système d'énergie est laissé sans protection, cependant les régions de chevauchement doit être faite aussi petite que possible.

Le tableau ci-dessous porte les principales fonctions de protection électrique et leurs codes

Code	Définition	Fonction
21	Protection de distance (à minimum d'impédance)	fonctionne lorsque la mesure d'admittance, d'impédance ou de réactance augmente ou diminue en dehors de limites prédéfinies
27	protection de sous tension	fonctionne à une valeur donnée de sous tension

32	protection directionnelle de puissance	fonctionne à une valeur prédéterminée de puissance dans un sens donné ou au retour de puissance résultant d'un retour d'arc dans l'anode ou la cathode d'un circuit d'un redresseur de puissance.
37	protection de sous intensité ou relais de sous charge	fonctionne lorsque le courant ou la puissance qui circule sur l'installation descend en dessous d'une valeur prédéterminée
49	protection thermique	fonctionne lors que la température d'une machine alternative, d'une charge comportant des enroulements, d'une machine à courant continu ou redresseur excède une valeur prédéterminée. (Protection contre les surcharges)
50	protection de Surintensité instantanée ou vitesse d'augmentation du courant	fonctionne instantanément pour une valeur excessive de courant, ou sur une valeur excessive de la progression de la surintensité ceci indiquant un défaut dans l'appareillage, l'équipement ou le circuit protégé.
51	protection de surintensité alternative temporisée	soit à temps constant soit à temps dépendant qui fonctionne lorsque le courant alternatif dépasse une valeur prédéterminée
59	protection de surtension	Assurée par un dispositif qui fonctionne pour une valeur donnée de surtension
61	protection de différence de courant	fonctionne pour une différence donnée de courant sur l'entrée ou la sortie de deux circuits
67	protection directionnelle de surintensité	fonctionne pour une valeur désirée ou une circulation de courant (surintensité) dans une direction prédéterminée
78	Mesure d'angle de phase ou relais de perte de synchronisme	fonctionne pour une mesure d'angle de phase prédéterminée entre deux tensions ou entre deux courants ou entre un courant et une tension
81	protection de fréquence	fonctionne pour une valeur prédéterminée de fréquence, soit une augmentation, une diminution par rapport à la valeur normale ou par rapport à un taux ou une variation de la fréquence
87	Protection différentielle	Fonctionne à partir d'un pourcentage, d'un angle de phase ou d'une autre grandeur pour une différence de deux courants ou de certaines autres grandeurs électriques
92	protection directionnelle de puissance	Fonctionne contre le changement de direction ou de sens d'écoulement de puissance (direction prédéterminée) et entraîne une déconnexion des deux branches ou réseaux l'un de l'autre quand la puissance qui circule entre eux dépasse une valeur donnée dans la direction opposée.

Chapitre IV.
Protection des systèmes

CH.IV : Protection des systèmes

1. Plan de protection.

Dans un système énergétique ; chaque grandeur électrique doit être surveillée, cela est assuré par des éléments capables ou relais destinés à chaque grandeur, il sont appelés selon la grandeur à contrôler, exemple relais de courant, relais de tension.....

Donc un plan de protection est l'ensemble des dispositions pour :

- éliminer les défauts en séparant l'élément défectueux du reste du système électrique par un organe de protection
- protéger certains matériels spécifiques (transformateur lignes, câbles)
- permettre la modification temporaire du fonctionnement (sensibilité, rapidité) pour effectuer certaines opérations, travaux sous tension.

2. Grandeurs à contrôler.

Les grandeurs mesurées par les capteurs peuvent être - courant, tension et fréquence, et les grandeurs calculées sont : Puissances, impédances....

Lorsque la mesure dépasse le seuil, la protection réagit par ouverture des disjoncteurs.

3. Protection d'un réseau électrique radial simple.

Tous les paramètres d'un réseau, peuvent être surveillés et contrôlés, pour identifier la nature de défaut survenu dans le SE généralement les variations de **I** et **U** sont la cause principale des variations des autres paramètres, déphasage, fréquence, puissance, retour de puissance....

Des différents relais doivent être installés, pour effectuer des mesures correctes et précis des grandeurs à contrôler..

3.1. Type des relais

Il existe généralement cinq types de relais, dans les systèmes de protection sont :

- relais à maximum à amplitude
- relais directionnel
- relais à distance
- relais différentiel
- relais à pilote

Pour la coordination des relais à maximum de courant **50** et **51** on doit déterminer les paramètres du réseau suivants :

3.2. Le seuil du courant instantané.

Il est choisi pour protéger la plus grande partie possible du réseau

3.3. Le courant de fonctionnement.

C'est une valeur de réglage, détermine le seuil de fonctionnement du détecteur, lorsque la valeur du courant dépasse une valeur prédéterminée dite (valeur de réglage du relais), notée I_p (pickup current)

I_p : intensité de démarrage du relais

I_f : intensité du défaut (courant de défaut)

Pour la Condition de déclenchement du RAC [RC], elle est fixée

$|I_f| \geq |I_p|$; Déclenchement (relais déclenche)

$|I_f| < |I_p|$; Pas de déclenchement (relais bloqué).

3.4 Le temps de fonctionnement.

Un paramètre important qui doit être connu et réglé pour chaque protection.

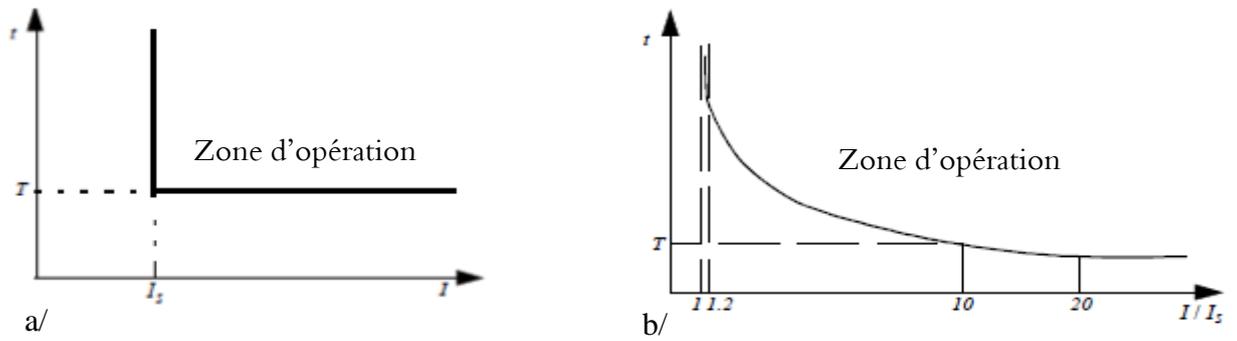


Fig.1 : **a.** Caractéristique à temps indépendant, **b.** Caractéristique à temps dépendant (à temps inverse).

I_s : seuil de courant de fonctionnement

T : délai de fonctionnement de la protection

3.4. La temporisation.

Elle est basé sur la réalisation d'un intervalle de temps qui permet au relais primaire d'avoir suffisamment de temps pour fonctionner, cette caractéristique assure le critère de base de coordinations entre les dispositifs de protection installées dans le SE. (Sélectivité).

3.5. Couverture des unités instantanées protégeant les lignes entre les soustractions.

Il s'agit à quelle distance, longueur la protection installée doit couvrir ou assurée sa protection.

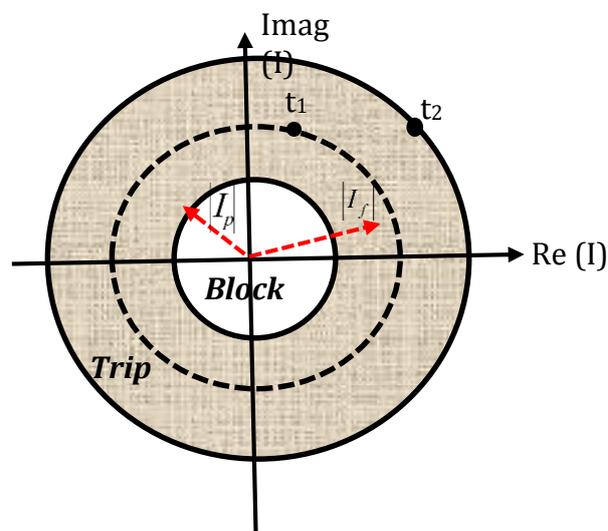


Fig.2 : Représentation graphique des courants I_f et I_p

$$t = g \cdot [|I_f| - |I_p|]$$

t_1 ; temps de fonctionnement du RC lorsque $I_f = I_{f1}$

t_2 ; temps de fonctionnement du RC lorsque $I_f = I_{f2}$

g ; est une fonction dépend de niveau du courant de défaut, elle diminue lorsque I_f devient très grand par rapport à I_p .

$$g \propto \frac{1}{\left| \frac{I_f}{I_p} \right|}$$

4. Protection différentielle 87.

Le principe dans ce cas est basé sur la comparaison des valeurs du courant traversant la protection installée aux deux extrémités de l'élément à protéger, (différence entre deux valeurs de tension et différence entre deux courants), la plus utilisée c'est la protection différentielle de courant.

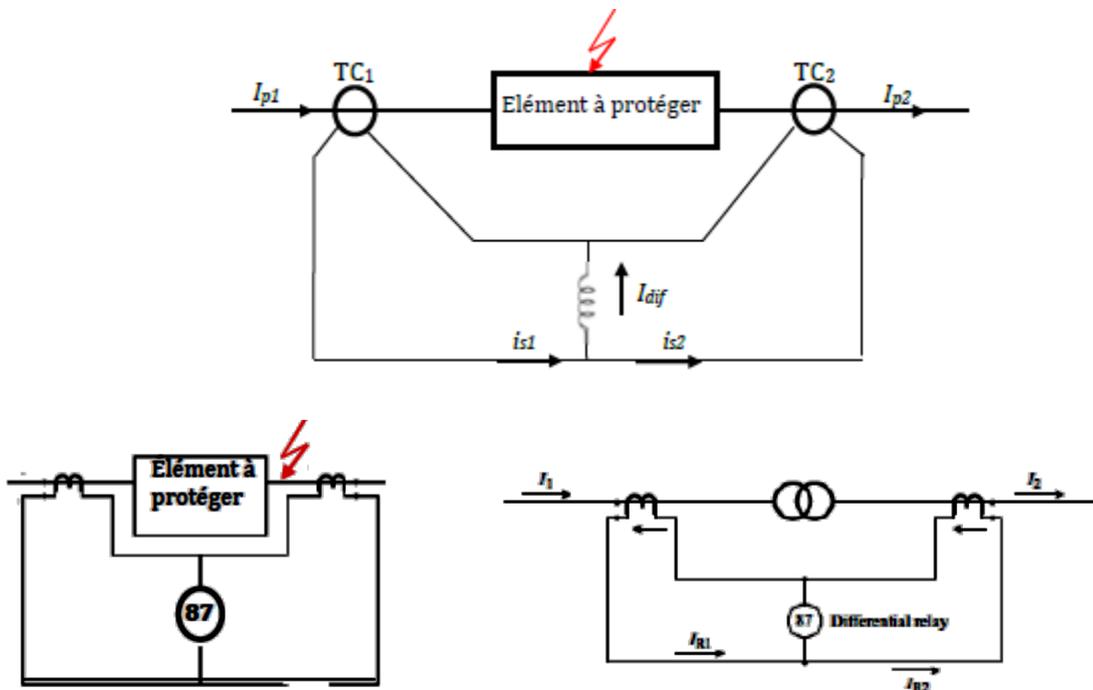


Fig.3 : Protection différentielle

$I_{diff} = i_{s1} - i_{s2}$ Avec i_{s1} ; courant secondaire du TC_1

i_{s2} ; courant secondaire du TC_2

$I_f = I_{diff} = i_{s1} - i_{s2}$

Cette protection différentielle fonctionne lorsque $I_{\Delta} = I_{diff} = i_{s1} - i_{s2}$

Depasse le seuil de réglage si non elle n'actionne pas.

La protection différentielle est basée sur la détection d'un courant différentiel traversant une bobine à maximum de courant, provoquant ainsi le déclenchement de l'organe d'exécution (disjoncteur).

5. Protection directionnelle 67.

Un relais détecte le sens d'écoulement de puissance dans le point où il est installé.

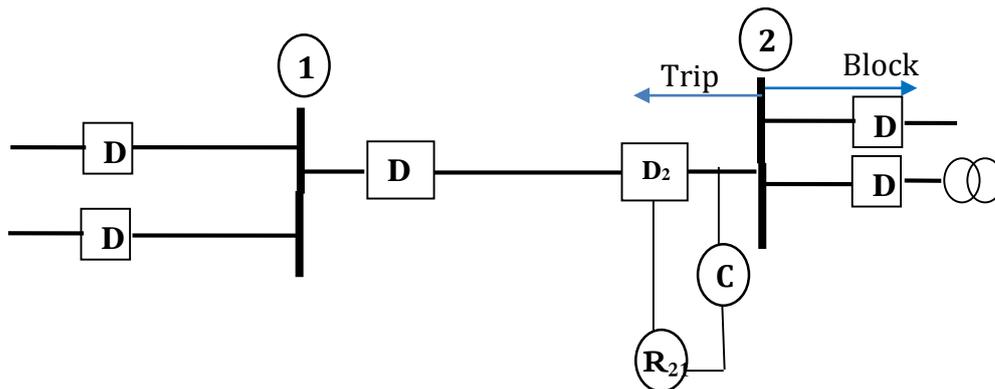


Fig.4 : Schéma de principe d'une Protection directionnelle

R_{21} : relais détecte tout défaut peut être apparu sur la partie gauche de son endroit

Si la puissance transmise de **1** vers **2** le R_{21} est bloqué

Si la puissance transmise de **2** vers **1** le R_{21} est déclenché

La protection directionnelle assure l'écoulement d'énergie électrique en sens normal et elle réagit dans le sens inverse, le sens d'écoulement du courant c.-à-d.,

la mesure de déphasage entre courant et tension permet de détecter la direction dans laquelle se trouve le défaut.

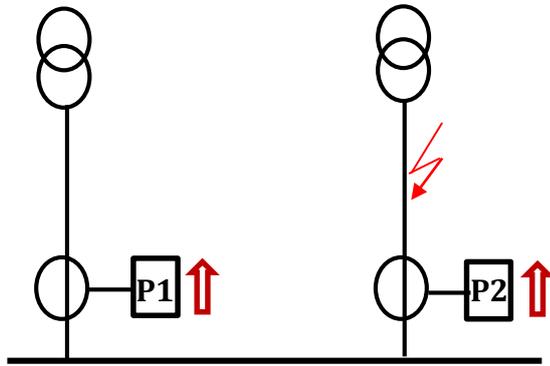


Fig.5.a : Deux liaisons en parallèle

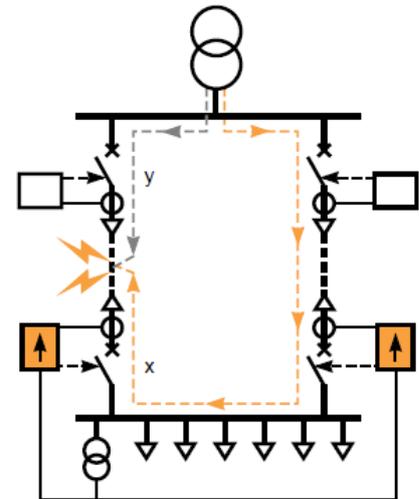


Fig.5.b : Réseau en boucle

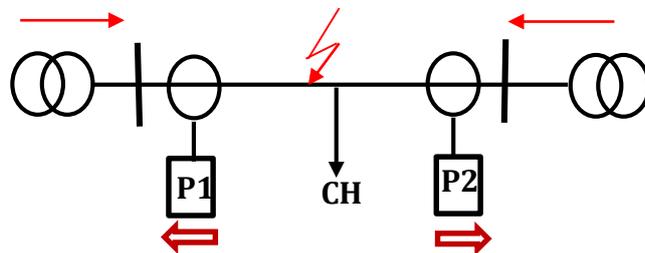


Fig.5.c : Deux sources alimentent une portion d'un réseau électrique

Il existe plusieurs types

→ Sens d'écoulement du courant du défaut

⇒ Sens de détection de la protection directionnelle.

En cas de défaut de court-circuit la protection réagit si le courant écoule passe dans le sens indiqué de la protection

Elle agit lorsque simultanément le courant ou la puissance dépasse un seuil et que l'énergie se propage dans une direction anormale. Il existe des protections directionnelles :

- de courant de phase.
- de courant résiduel
- de puissance active
- de puissance réactive.

Lorsque deux sources, deux liaisons, ou plus, fonctionnent normalement en parallèle **Fig.5.a,b** et **c** ; il y a un risque d'arrêt générale la distribution lors d'un défaut n'affectant qu'un de ces éléments. En effet tous ces éléments sont parcourus par le courant de défaut, avec un changement de sens du courant dans l'élément défectueux.

Les protections directionnelles sont donc utilisées pour distinguer le seul élément défectueux et commander son isolement des autres éléments encore sains.

6. Protection à distance 21.

Protection réagit à la valeur de l'impédance de court-circuit et utilise les relais de résistance, le principe est basé sur le rapport ; $\frac{U}{I} = Z$

Ce type de protection fonctionne à partir des grandeurs mesurées que sont le courant, la tension et le sens d'écoulement de l'énergie. à l'aide de ces informations le dispositif de protection calcule l'impédance de l'équipement contrôlé, ses seuils sont ajustables, pour chaque point de court-circuit on peut définir l'impédance comme suit ; $Z_k = \frac{U_k}{I_k}$

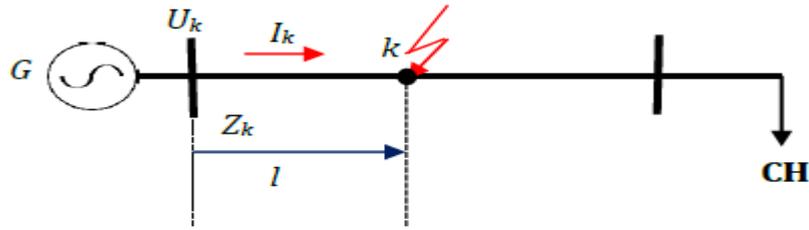


Fig.6 : Représentation du point de défaut

Elle réagit si ; l'impédance entre le jeu de barre 1 et le point de court-circuit dépasse une impédance de réglage du relais à distance.

$$Z = \frac{U_1}{I_{12}} \text{ avec } I_{12} = I_k \text{ et } U_1; \text{ tension dans le jeu de barre.}$$

$|Z| \leq |Z_r|$ Déclenchement du relais (ouverture de leurs contacts mobiles, trip)

$|Z| > |Z_r|$ Relais est bloqué (le n'est pas déclenché) (block).

- En condition ou bien en régime de fonctionnement normal nous avons

$$I_{12} = \frac{U_1}{Z_{12}} = I_n \text{ Cette valeur est faible puisque l'impédance est de valeur importance}$$

- En régime de court-circuit (défaut dans un point entre le jeu de barres 1 et 2) $I_{cc} \gg I_{12}$, Z est une faible impédance, dans le plan complexe elle est représentée par un vecteur trouvant dans la zone de déclenchement du relais.

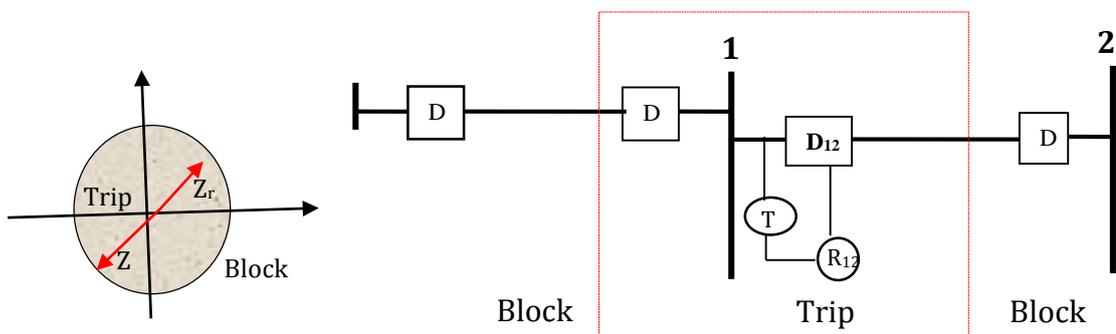


Fig.7. Zone de couverture de la protection

D'après la **Fig.6**. En mesurant donc U_k et I_k , et on détermine Z_k comme

$$Z_k = Z_0 \cdot l_k \text{ d'où } I_k = \frac{Z_k}{Z_0} = \frac{U_k}{I_k \cdot Z_0}$$

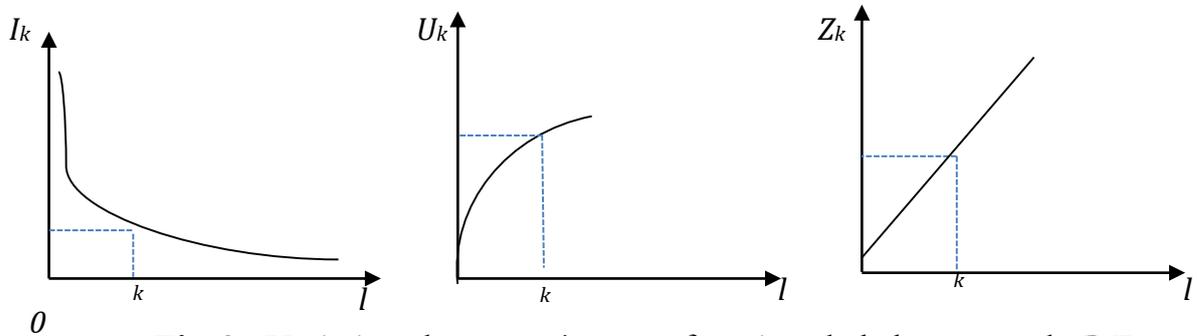


Fig.8 : Variation des paramètres en fonction de la longueur du RE.

7. Coordination et sélectivité.

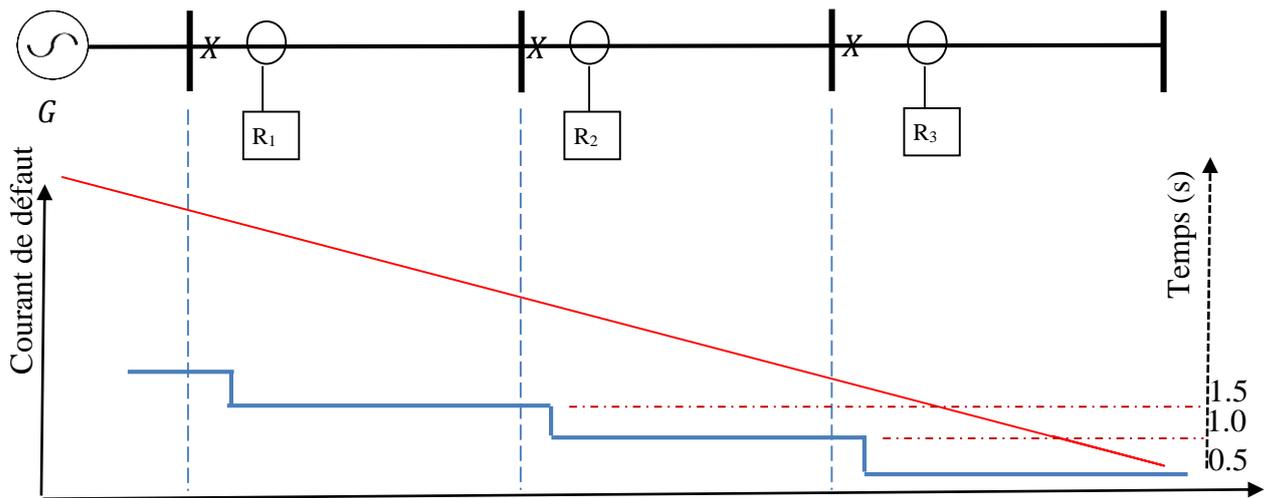


Fig.9 : Sélectivité entre la protection d'un RE

Pour assurer la coordination (sélectivité ampèremétrique) et chronométrique entre les différents relais on peut les coordonner comme suite :

$I_{R1} > I_{R2} > I_{R3}$; pour les courant seuils des relais

$t_{R1} > t_{R2} > t_{R3}$; pour les temps de déclenchement des relais.

Le temps de fonctionnement des relais doit être réglé de la manière suivante.

$$t_3 = 0.5 (s)$$

$$t_2 = 0.5 + 0.5 = 1 (s)$$

$$t_1 = 1 + 0.5 = 1.5 (s)$$

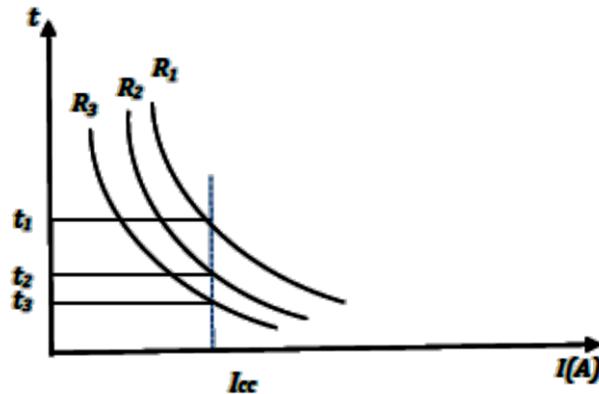


Fig. 10 : Diagramme des courbes de sélectivité chronométrique des relais

8. Protection des câbles contre le C-C

En cas de court-circuit dans un câble, une énergie développée par le courant traversant le câble est donnée par : $E = R \cdot I^2 \cdot t$ 1

Pour le conducteur de longueur $l(m)$ et de section $S(mm^2)$, on obtient

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad 2$$

et on trouve d'après l'équation 1

$$E = \frac{\rho \cdot l}{S} \cdot I^2 \cdot t \quad 3$$

Avec; ρ : résistivité du conducteur, S : section du câble ; l : son longueur.

Cette énergie sous forme de chaleur fait augmenter la température du câble, si cette énergie devient supérieure à l'énergie reçue par le matériau cuivre.

La capacité calorifique spécifique d'un cuivre reflète sa capacité à cumuler de l'énergie sous forme thermique, pour une masse donnée, quand sa température augmente.

$$E = m. C.(T_2 - T_1) \quad 4$$

Si on écrit la masse du câble en fonction de son longueur et sa section, on obtient alors :

$$m = d. S.l \quad 5$$

m ; masse du conducteur, d ; masse spécifique

Remplaçant m dans l'équation 4 par sa valeur ; on obtient ainsi ;

$$E = d. S.l.C.(T_2 - T_1) \quad 6$$

En cas d'échange énergétique (l'énergie produite = énergie reçue)

Il devient ; $\frac{\rho.l}{S} . I^2 . t = d. S.l.C.(T_2 - T_1)$ 7

$$I^2 . t = d. S^2 . C.(T_2 - T_1) / \rho \quad 8$$

Ou T_1 : température initiale, T_2 : température finale au bout du temps t, t : temps.

Chaque matériau isolant tel que le PVC ou autre peut se dégrader au-delà d'une température limite (maximale).

Si on pose T_2 : la température limite du matériau, dont $(T_2 - T_1)$ dépend seulement de ce matériau isolant.

On pose maintenant $k^2 = d.c(T_2 - T_1) / \rho$ l'expression 8 devient alors ;

$I^2 . t = k^2 . S^2$ ce qui donne finalement que ;

$$t = \frac{k^2 . S^2}{I^2} \quad 9$$

Le coefficient k représente une limite, il dépend de la matière du conducteur et du type d'isolant $k^2 = d.c(T_2 - T_1) / \rho$

Matière	Type d'isolant	Température initiale °c	Température limite °c	K
Cuivre	PVC	70	160	115
cuivre	PVC	90	160	100
Cuivre	PR/EPR	90	250	143
Aluminium	PVC	70	160	76
Aluminium	PVC	90	160	66
Aluminium	PR/EPR	90	250	94

t : c'est le temps maximal que supporter l'isolant, il définit le temps de déclenchement de la protection à maximum de courant avant la détérioration du câble.

L'équation 9 peut s'écrire également sous la forme.

$$\sqrt{t} = \frac{k \cdot S}{I} \quad 10$$

tel que ; S en (mm²), I en (A), et t en (s).

Application :

Considérons un câble en cuire, dont l'isolant est de type PVC, sa section S= 16 mm², déterminer le temps maximum de coupure lorsque la câble est traversé par un courant de court-circuit I_{cc} = 20000 A

Solution :

En appliquant l'équation 9, on trouve $t = \frac{115^2 \cdot 16^2}{20000^2} = 0.092s = 92ms$

Alors la protection doit avoir un temps de déclenchement de l'ordre de 92ms.

Références bibliographiques.

- [1] Christophe Prévé, "Protection des réseaux électriques", Hermes Paris 1998.
- [2] Furan Gonon, "Electric Power distribution system engineering", Edition 1980.
- [3] L. Féchant, "Appareillage électrique à BT, Appareils de distribution", Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique, D 4 865.
- [4] P. Bertrand, "les protections directionnelles", Cahier Technique Merlin Gerin N° 181, Techniques de l'Ingénieur.
- [5] J. Lewis Blackburn ,Thomas J. Domin,"Protective Relaying Principles and Applications",Third Edition , 2006.
- [6] Anthony F Sleva, "protective relay principles".
- [7] L.G.Hewitson, M.B.Ramesch, "Practical Power Systems Protection", First published 2004, Copyright © 2004, IDC Technologies.
- [8] Sites internet.