



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Electrotechnique et Automatique



Brochure de travaux pratiques.

Techniques de protection électrique

Partie 1

Dr. BELOUCIF Faissel



Octobre 2019



Sommaire

Avant-propos	1
TP N°1 : Relais à maximum de courant à temps constant (Indépendant).....	2
TP N°2 : Relais à maximum de courant à temps inverse (Dépendant).....	6
TP N°3 : Relais directionnel monophasé.....	12
TP N°4 : Relais différentiel.....	16
TP N°5 : Relais de tension (Maximum et minimum de tension).....	21
TP N°6 : Réducteurs de mesure (TC et TP).....	27
TP N°7 : Protection différentielle par des transformateurs de courant.....	42
TP N°8 : Comparaison entre les différents régimes de neutre.....	46
Références Bibliographiques.....	61



Avant-propos

La qualité de l'électricité est un facteur important du développement socio-économique, il est également essentiel de fournir l'énergie électrique aux différents consommateurs en bonnes conditions, cela n'est assuré que par des bons schémas de protection et de réglages des éléments de protections.

Les dispositifs de protection surveillent en permanence l'état électrique des éléments d'un réseau et provoquent leur mise hors tension (par exemple l'ouverture d'un disjoncteur), lorsque ces éléments sont le siège d'une perturbation indésirable; tel que, court-circuit, défaut d'isolement...etc.

Cette brochure de travaux pratique peut donc compléter les cours de technique de protection des réseaux électriques programmés pour les parcours de master 1, elle est aussi destinée aux étudiants de la licence professionnalisante, spécialité protection des réseaux électriques.

Cet ouvrage pourra donc servir pendant l'analyse des systèmes de protection, d'accompagner tout initié dans le domaine des protections électriques d'apprendre facilement les techniques de branchement et les étapes de réglages des différents organes de protection électriques.

Il pourra être aussi utilisé par d'autres techniciens qui voudraient avoir une idée qualitative des problèmes liés aux protections électriques, afin d'éviter la détérioration des équipements électriques en cas de fonctionnement dans de mauvaises conditions.

Cette brochure apporte des connaissances sur les techniques de protection électrique; elle permet également de mieux comprendre les astuces de raccordement des éléments de protection dans les installations électriques, donc elle traite en profondeur une matière enseignée dans la filière d'électrotechnique, option réseaux électriques, protection des réseaux électriques.

Dr. Beloucif Faissel



TP N°1 : Relais à maximum de courant à temps constant (Indépendant)

1. Objectif

Les buts visés par l'étude des relais à maximum de courants sont multiples :

- ☞ Comprendre le principe de fonctionnement des relais à maximum de courant.
- ☞ Déterminer leurs caractéristiques.
- ☞ Maîtriser leur branchement dans les installations électriques.

2. Rappel théorique

2.1. Définition

C'est un relais électromagnétique qui fonctionne lorsque le facteur électrique (courant) pour lequel est réglé dépasse les limites fixées. Ce type de relais est utilisé pour protéger les circuits électriques contre les surintensités provoquées par les surcharges et les courts-circuits.

Les relais à temps constant sont habituellement préférés pour leur simplicité dans le choix des niveaux de sélectivité. Leur utilisation entraîne normalement des temps de fonctionnement assez longs pour les relais les plus proches de la source d'énergie

Inversement lorsque l'amplitude du courant de défaut diminue sensiblement avec l'éloignement du lieu de défaut par rapport à la source d'énergie ; l'utilisation des relais à temps dépendant permet de réduire de manière appréciable les temps de déclenchement.

2.2. Caractéristique

- ☞ le relais à maximum de courant à temps constant (indépendant) fonctionne de manière que le temps de déclenchement (fonctionnement) ne dépend pas de la valeur de courant de surintensité.

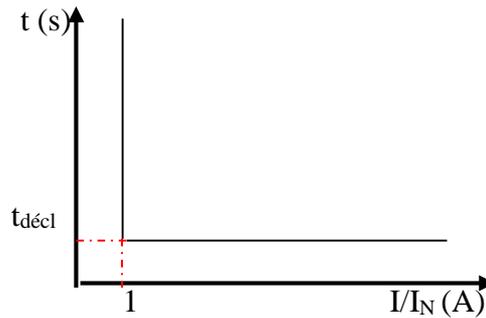


Figure 1.1. Caractéristique du relais indépendant.

☞ Le coefficient de retour détermine la sensibilité du relais de courant, et peut être défini par l'expression ;

$$k_r = \frac{I_r}{I_f} \leq 1 \quad (1.1)$$

Avec I_f ; courant de fonctionnement ou courant d'enclenchement du relais

I_{ret} ; courant de retour à l'état initial du relais.

3. Matériels nécessaires

N°	Désignation	Reference	Nbre	Observations
01	Relais à maximum de courant monophasé à temps constant	745 291	01	sa propre alimentation est de 220 V
02	Relais à maximum de courant monophasé à temps inverse	745 231	01	sa propre alimentation est de 220 V
03	Source d'alimentation variable de 0-260 V	725 77	01	0-260 V alternatif et continu
04	Modèle d'une ligné aérien triphasée	745 51	01	$\ell = 360 \text{ Km}$, $R = 13 \Omega$ $L = 290 \text{ mH}$, $C_B = 5 \mu\text{F}$
05	ampèremètre	727 31	01	0 ÷ 1 A
06	ampèremètre	727 32	03	0 ÷ 2,5 A
07	voltmètre	727 38	01	0 ÷ 100 V
08	Testeur sonneur ou de continuité		01	
09	Résistance variable	733 10	01	0 ÷ 1000 Ω



4. Manipulation

- ☞ Réaliser le montage de la figure 1.2.
- ☞ Pour cette expérience, utiliser deux branches individuelles en parallèle à la résistance de la charge (cat n°.733.10).
- ☞ Mettre le curseur à la position 10%, pour avoir une résistance totale $R_{ch} = 50 \Omega$
- ☞ Faire varier le courant de réglage (seuil) du relais $I_r = I > I_N$ de **0,5** jusqu'à **2** avec un pas de **0,25**.
- ☞ Relever les courants et les tensions qui provoquent le fonctionnement (enclenchement) et le retour du relais à sa position initiale pour chaque valeur du courant de réglage.
- ☞ Mettre les mesures dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1.1

$I_r = I > I_N$	0,6	0,8	1,0	1,2	1,6	1,8	2,0
Courant de fonctionnement (opération) I_f (A)
Tension correspond au fonctionnement (V)
Courant de retour I_r (A)
Coefficient de retour k_r

☞ Remarque

L'étudiant peut observer le fonctionnement et le retour du relais, soit par un testeur sonneur branché entre les bornes **11-12** du contact du relais soit à partir des indicateurs lumineux (diodes électroluminescentes) LEDS sur le relais.

LED Verte : indique que le relais est sous tension

LED Jaune : l'instant de détection du défaut par le relais (courant atteint la valeur seuil du relais)

LED Rouge : indique l'enclenchement du relais (ouverture du contact entre 11 et 12) et la disparition du son provient du testeur sonneur.

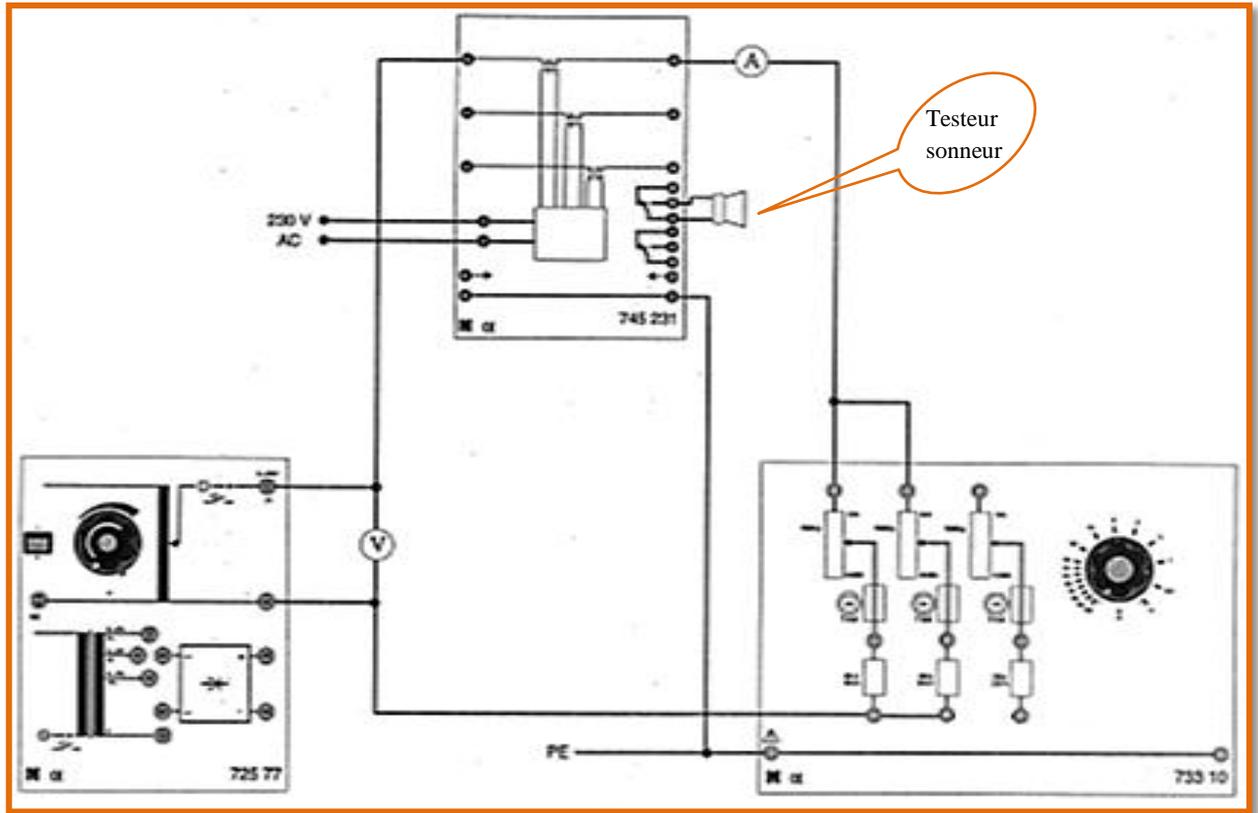


Figure 1.2. Réponse d'un relais à maximum de courant à temps constant.

5. Question

- ✗ Calculer le coefficient de retour, en déduire la performance et la sensibilité du relais.
- ✗ Tracer la caractéristique $k_r = f(I_r)$.



TP N°2 : Relais à maximum de courant à temps inverse (Dépendant)

1. Objectif

Les buts visés par l'étude des relais à maximum de courants sont multiples :

- ☞ Maîtriser le branchement des relais à maximum de courant dans les réseaux électriques.
- ☞ Étudier le fonctionnement du relais dépendant IDMT et sa réaction pour différents réglages.
- ☞ Comprendre la caractéristiques courant / temps de déclenchement des relais IDMT.

2. Rappel théorique

2.1. Définition

Il fonctionne lorsque le facteur électrique (courant) pour lequel il est réglé, dépasse les limites fixées. Ces relais sont plus particulièrement recommandés pour:

- Laisser passer des surcharges transitoires importantes
- Assurer une bonne coordination lors de la présence de fusibles dans le réseau.

Les réglages du relais sont d'abord déterminés assurer les temps de fonctionnement les plus courts aux niveaux des défauts à courant plus élevés. L'utilisation des relais à temps inverse est donc recommandée dans ce cas.

Lorsque l'amplitude du courant de défaut diminue sensiblement avec la distance du défaut à la source d'énergie, l'utilisation des relais à temps dépendant permet de réduire de manière appréciable les temps de déclenchement.

2.2. Caractéristique

- ☞ Le temps de fonctionnement du relais à temps normalement inverse, s'exprime par l'équation approximative suivante :

$$t(s) = \frac{0.14}{\left[\frac{I}{I_r} \right]^{0.02} - 1} \cdot t_{I_r} \quad (2.1)$$

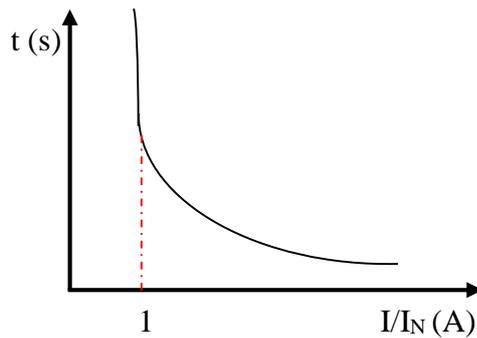


Figure 2.1. Caractéristique du relais dépendant.

3. Matériels nécessaires

N°	Désignation	Reference	Nbre	Observations
01	Relais à maximum de courant monophasé à temps inverse	745 231	01	sa propre alimentation est de 220 V
02	Source d'alimentation variable de 0-260 V	725 77	01	0-260 V alternatif et continu
03	Modèle d'une ligné aérien triphasée	745 51	01	$\ell = 360 \text{ Km}$, $R = 13 \Omega$ $L = 290 \text{ mH}$, $C_B = 5 \mu\text{F}$
04	ampèremètre	727 31	01	$0 \div 1 \text{ A}$
05	ampèremètre	727 32	03	$0 \div 2,5 \text{ A}$
06	voltmètre	727 38	01	$0 \div 100 \text{ V}$
07	Résistance variable	733 10	01	$0 \div 1000 \Omega$

4. Manipulation

Ce qui est important de savoir, avant l'étape de mise en marche du montage de la figure 2.2 :

- ☞ La caractéristique du relais à maximum de courant à temps inverse a évolué. Avec cette caractéristique, le moment de l'opération est inversement proportionnel au niveau du courant de défaut.
- ☞ Cette caractéristique réelle est une fonction à la fois du «temps» et des paramètres «actuels».

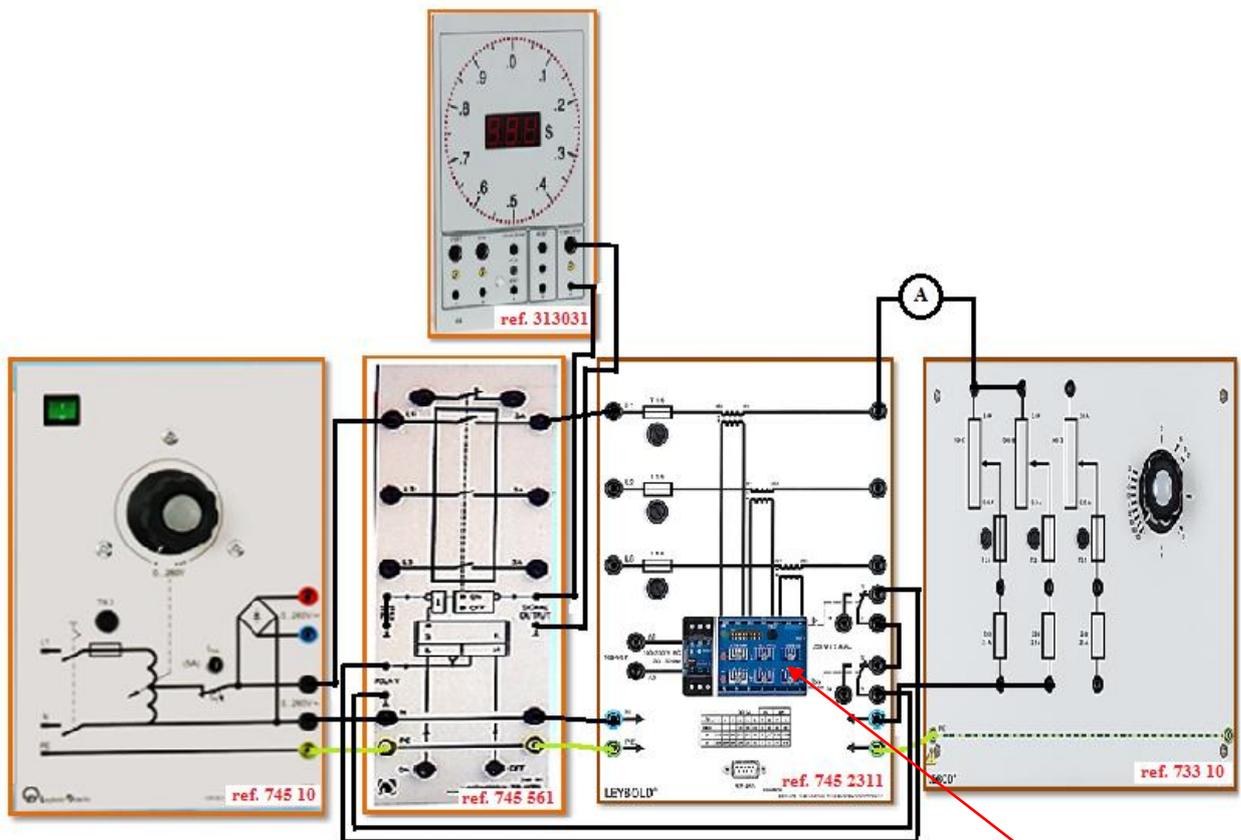
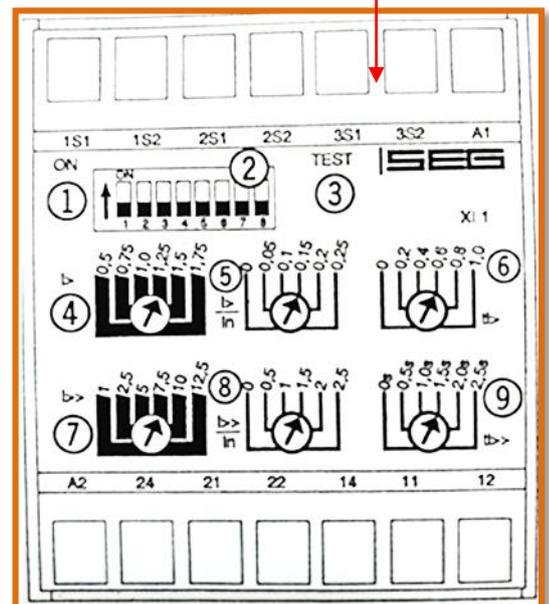


Figure 2.2. Réponse d'un relais à maximum de courant à temps inverse.

☞ utiliser le bloc de commande ci-dessous pour le paramétrage du relais de courant.

- ① LED pour indiquer le fonctionnement (verte)
- ② DIP (dual on -line package) micro-interrupteur (commutateurs)
- ③ Bouton de test.
- ④ LED pour indiquer le seuil de surintensité (rouge)
- ⑤ Réglage du courant pour l'étage à maximum de courant $I_{>}/I_N$.
- ⑥ Réglage de temps de retard $t_{i>}$ pour le seuil de surintensité
- ⑦ LED pour indiquer la surintensité instantanée (rouge).





- ⑧ Réglage du seuil de surintensité instantané pour un courant $I_{>>}/I_N$
- ⑨ Réglage du temps pour le seuil de surintensité instantané $t_{I>>}$
- ☞ La disponibilité opérationnelle du relais est indiquée par une LED (verte).
- ☞ Deux LEDs rouges clignotent et restent allumées pendant le déclenchement qui correspond le démarrage du seuil de surcharge ou du seuil de surintensité instantané.
- ☞ La sortie est exécutée via un contact de commutation en cas de déclenchement à maximum de courant (bornes 11, 12, 14) et déclenchement à maximum de courant instantané (bornes 21, 22, 24).
- ☞ Si les déclenchements à maximum de courant et le déclenchement instantané à maximum de courant sont censés agir de manière conjointement sur un disjoncteur, les contacts doivent être combinés en série (voir figure 2.2)

☞ Paramétrage du relais :

Interrupteur en position ON	Interrupteur en position OF	Relais Fonctionne à :
4	1-2-3-6	Temps constant et fréquence du réseau 50Hz
1	2-3-6	Maximum de courant à temps normalement inverse.
2	1-3-6	Maximum de courant à temps très inverse.
3	1-2-6	Maximum de courant à temps extrêmement inverse.
4	/	Seuil de surintensité instantané ($I_{>>}$) est opérationnel Seuil de surintensité $I_{>}$ est bloqué
5	/	Seuil de surintensité $I_{>}$ est opérationnel Seuil de surintensité instantané ($I_{>>}$) peut être bloqué
6	/	Fréquence du réseau 60Hz

Attention

- Un seul des micros-interrupteurs (1, 2 et 3) qui doit être en position ON ; les autres sont portés à la position OFF.
- Un seul des micros- interrupteurs (7 ou 8) qui doit être en position ON ; l'autre est met à la position OFF.



Procédures de l'expérience

- ☞ Réaliser le montage de la figure 2.2
- ☞ Mettre le curseur de la charge résistive à la position 10% ($R_{\text{totale}} = 50 \Omega$).
- ☞ Réglez le relais sur la valeur actuelle $I_{>} / I_N = 0,5$, et la valeur de la temporisation (temps de retard) $t_{I>}$ est réglé à la valeur 0,2 s, Le courant traversant le relais est lié à cette valeur.
- ☞ Faire varier progressivement la tension du transformateur monophasé, pour que les courants indiqués dans Les tableaux suivants traversent le relais.
- ☞ Relever le temps correspond au courant de déclenchement du relais à chaque étape, et n'oublier pas de réinitialiser le Chronomètre électronique).
- ☞ Pour les valeurs actuelles supérieures à 2 A, les mesures doivent être effectués rapidement pour éviter un échauffement excessif de la charge résistive.
- ☞ Maitre les mesures dans le Tableau 2.1 ; $I_{>} / I_N = 0,5$ et $t_{I>} = 0,2$ (s)

$I = I_m = I_{\text{decl.}}$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
valeur de réglage $I_r = I/I_{>}$	1	2	3	4	5	6
$t_{\text{mesuré}}$ (s)	.....	.....	.....	.....	.....	.....
$t_{\text{calculé}}$ (s)	.....	.....	.....	.....	.....	.....

- ☞ Refaire les mesures pour les cas suivants.

Tableau 2.2 ; pour $I_{>} / I_N = 0,5$ et $t_{I>} = 0,4$ (s)

$I = I_m = I_{\text{decl.}}$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
valeur de réglage $I_r = I/I_{>}$	1	2	3	4	5	6
$t_{\text{mesuré}}$ (s)	.....	.....	.....	.....	.....	.....
$t_{\text{calculé}}$ (s)	.....	.....	.....	.....	.....	.....

Tableau 2.3 ; pour $I_{>} / I_N = 0,5$ et $t_{I>} = 1$ (s)

$I = I_m = I_{\text{decl.}}$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
valeur de réglage $I_r = I/I_{>}$	1	2	3	4	5	6
$t_{\text{mesuré}}$ (s)	.....	.....	.....	.....	.....	.....
$t_{\text{calculé}}$ (s)	.....	.....	.....	.....	.....	.....



Tableau 2.4 ; pour $I_{>} / I_N = 1$ et $t_{I_{>}} = 0,2$ (s)

$I = I_m = I_{decl.}$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
valeur de réglage $I_r = I/I_{>}$	1	2	3	4	5	6
$t_{mesuré}$ (s)	.....	.....	.....	.....	.....	.....
$t_{calculé}$ (s)	.....	.....	.....	.....	.....	.....

Tableau 2.5 ; pour $I_{>} / I_N = 1$ et $t_{I_{>}} = 1$ (s)

$I = I_m = I_{decl.}$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
valeur de réglage $I_r = I/I_{>}$	1	2	3	4	5	6
$t_{mesuré}$ (s)	.....	.....	.....	.....	.....	.....
$t_{calculé}$ (s)	.....	.....	.....	.....	.....	.....

5. Question

- ✂ Comparez les temps mesurés avec ceux calculés à partir de l'expression (2.1).
- ✂ Tracer la caractéristique $t = f(I_r)$.



TP N°3 : Relais directionnel monophasé

1. Objectif

- ☞ Maîtriser le branchement des relais directionnels.
- ☞ Étudier le principe de fonctionnement.

2. Rappel théorique

Ce type de relais apparaît aujourd'hui comme une excellente opportunité pour améliorer à la fois la puissance transitée sur un réseau et la qualité de service.

Le concept direction est très important dans plusieurs applications des relais de protection. Ce type de protection fonctionne à partir du courant, de la tension et du sens de l'écoulement de l'énergie.

Il agit lorsque simultanément le courant ou la puissance dépasse un seuil et que l'énergie se propage dans une direction prédéfinie, Afin d'éviter par exemple une marche en moteur d'un générateur connecté en parallèle à une autre source.

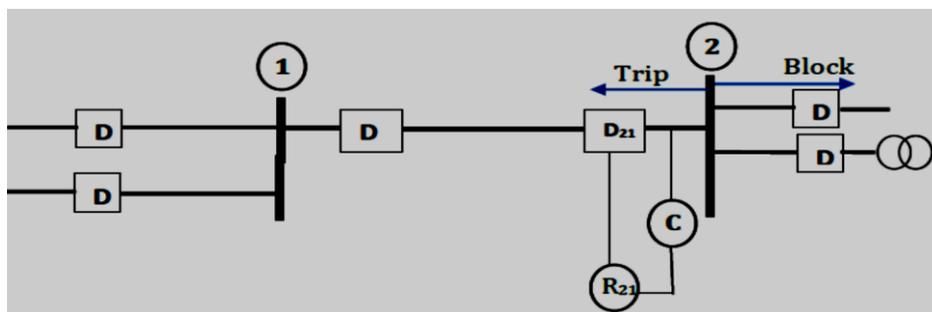


Figure 3.1. Schéma de principe d'une Protection directionnelle

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

R₂₁ : relais qui détecte tout défaut qui peut être apparu sur la partie gauche de son endroit :

Si la puissance transmise de 1 vers 2 le R₂₁ est bloqué.

Si la puissance transmise de 2 vers 1 le R₂₁ est déclenché.



3. Matériels nécessaires

N°	Désignation	Reference	Nbre	Observations
01	Relais directionnel monophasé	745 292	01	sa propre alimentation est de 220 V
02	Source d'alimentation variable de 0-260 V	725 77	01	0-260 V alternatif et continu
03	Charge résistive	745 10	01	0 ÷ 1000 Ω
04	Charge L-C	745 31	01	/
05	ampèremètre	727 31	01	0 ÷ 1 A
06	ampèremètre	727 32	01	0 ÷ 2,5 A
07	voltmètre	727 39	01	100/400 V
08	Fils de connexion	/	/	Différentes couleurs

4. Manipulation

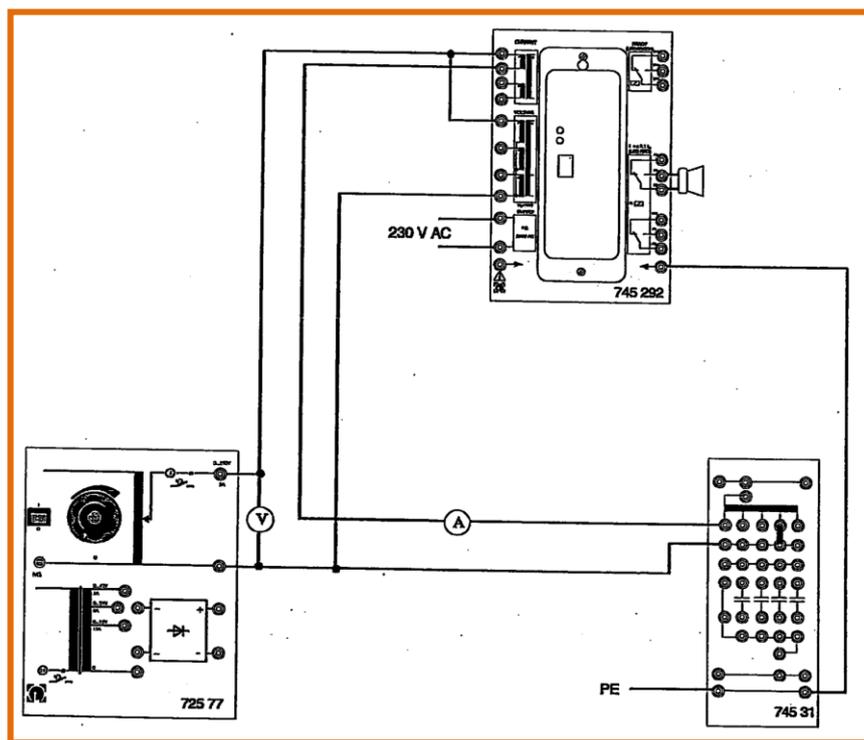


Figure 3.2. Schéma de montage du relais directionnel.



- ☞ Ce relais est particulièrement bien adapté à la détection directionnelle des défauts unipolaires, notamment dans les réseaux avec un point neutre actif et avec un point neutre isolé. Un courant résiduel de défaut à la terre important est prévu.
- ☞ Il est utilisé conjointement à un relais à maximum de courant à temps défini ou à temps inverse.
- ☞ Afin de déterminer la direction, le relais nécessite la mesure de la composante homopolaire de la tension et de courant de la branche défectueuse. C'est pour cela qu'il existe deux entrées pour $I_N = 1$ A (bornes A6, A7) et $I_N = 5$ A (bornes A2, A3). sont fournies pour le courant homopolaire, qui est mis à disposition.
- ☞ La tension homopolaire peut être tirée d'un transformateur de tension monophasé en reliant les bornes (A6 avec A1) et A6 avec le neutre, par contre lorsque le relais est utilisé en triphasé La tension du transformateur est connecté aux terminaux A1, A4, A5, A8.
- ☞ Un angle de référence peut être réglé sur des valeurs allant de -90° à $+90^\circ$ avec un pas de 15° .
- ☞ Si le courant homopolaire mesuré par le relais directionnel se trouve dans la partie du non déclenchement, le relais ne fonctionne pas. Mais si la composante homopolaire est situé dans la région hachurée de l'autre côté, le relais fonctionne (voir Figure. 3.3).

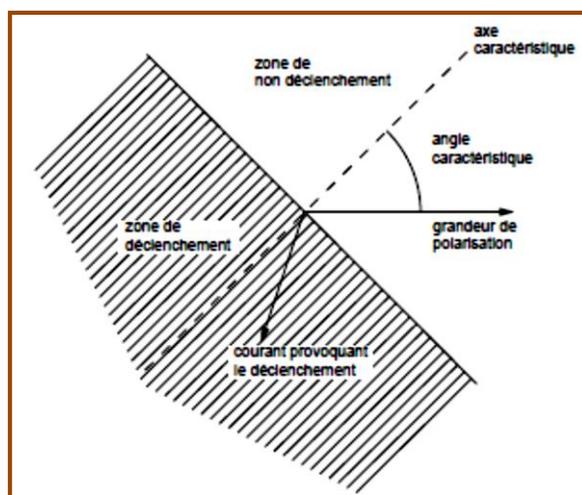


Figure 3.3. Zone de déclenchement d'un relais directionnel.



☞ la tension du transformateur d'alimentation monophasé est réglée à env. 50 V pour toutes les procédures de l'expérience; en utilisant les charges de types (résistive, inductive et capacitive), déterminez à quelle angle caractéristique le relais doit être déclenché (opérationnel).

5. Question

- ☞ Diminuer la tension de l'alimentation jusqu'à une valeur nulle, et puis répéter les mesures pour une résistance $R= 100 \Omega$, Inductance $L=300 \text{ mH}$ et Capacité $C= 30 \text{ mF}$, séparément.
- ☞ Maîtriser les résultats dans un graphique. Indiquer l'angle trouvé dans un diagramme de phase tension et de courant de chaque type de charge.



TP N°4 : Relais différentiel

1. Objectif

- ☞ Comprendre les défauts de terre et d'isolement (courant résiduel).
- ☞ Maitriser le branchement et le réglage du relais différentiel pour réaliser une protection différentielle.
- ☞ Déterminer la réponse du relais différentiel pour plusieurs courants de défauts courant de différence entre les courants traversant les côtés primaires et secondaires du transformateur.

2. Matériels nécessaires

N°	Désignation	Reference	Nbre	Observations
01	Relais de transformateur différentiel	745 331	01	sa propre alimentation est de 220 V
02	Transformateur triphasé, couplage triangle-étoile avec prises de réglage de tension	74550	01	380/380, $S_{nom} = 790$ VA $U_2 = (-15, -10, -5, +5, +10)\% U_N$
03	Modèle d'une ligné aérien triphasée	74551	01	$\ell = 360$ KM , $R = 13 \Omega$ $L = 290$ mH , $C_B = 5 \mu F$
04	ampèremètre	72731	01	0 ÷ 1 A
05	ampèremètre	72732	03	0 ÷ 2,5 A
06	voltmètre	72738	01	0 ÷ 600V
07	Bobine de Petersen réglable	74557	01	0 ÷ 2000 mH
08	Résistance variable	73310	01	0 ÷ 1000 Ω

3. Manipulation

Une protection différentielle compare les courants entrant et sortant du transformateur, Lorsqu'un défaut apparaît dans sa zone, la protection différentielle opère instantanément quand le courant différentiel mesuré est supérieur à la valeur programmée dans le relais.



3.1. Essai N° 1

☞ Réaliser le montage de la figure 4.1.

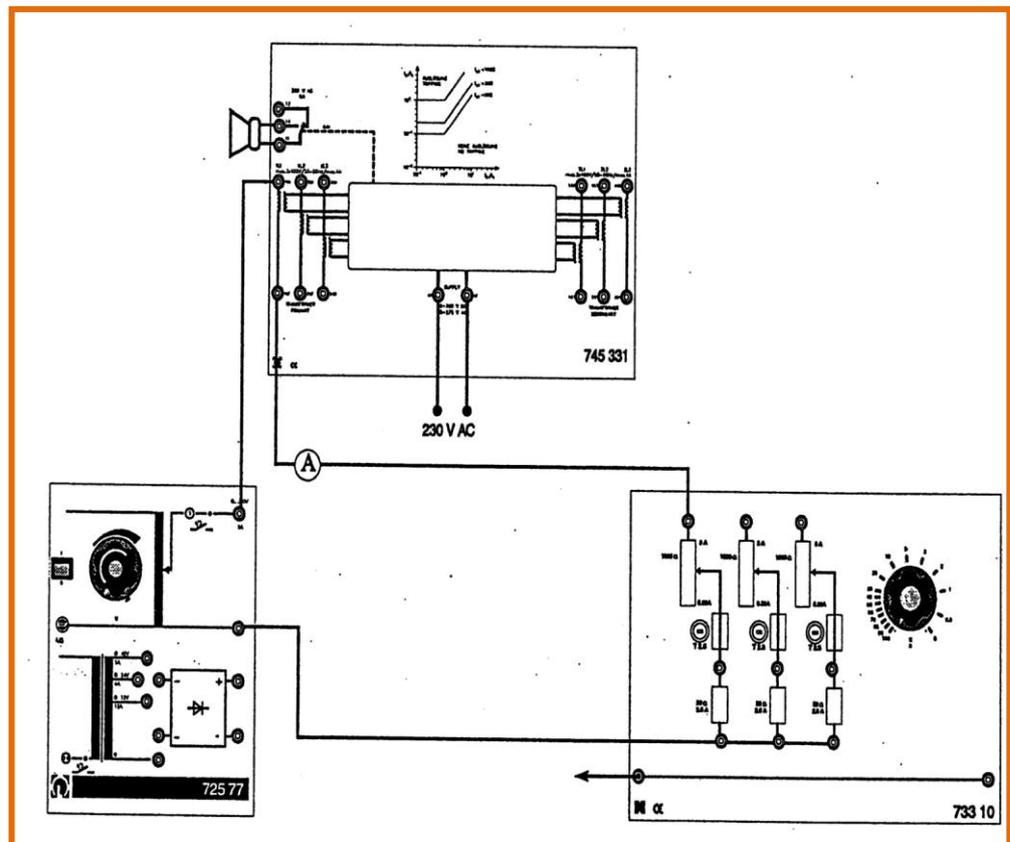


Figure 4.1. Circuit pour la détermination de la réponse du TR différentiel pour une charge monophasée.

- ☞ La résistance de la charge est réglée approximativement à **10%**.
- ☞ Le paramètre de déclenchement I_{d1} est varié de **5%** jusqu'à **35%** avec un pas de **10%**.
- ☞ Augmenter progressivement la tension de l'alimentation variable afin d'augmenter le courant dans le circuit jusqu'à le déclenchement du relais.
- ☞ Faire abaisser la tension pour que le relais reprend son état d'origine.
- ☞ Enregistrer les mesures dans le **tableau 4.1**.



Tableau 4.1

I_{d1} %	5	15	25	35
Valeur du courant. 1,73 (A)	.....	.....	....	.....
Courant de déclenchement (A)	.....	.....	....	.....
Courant de retour du relais (A)	....	.....	....	....
rapport de réinitialisation = U_r / U_f	...	.....	.....	.....

☞ Répéter les mêmes mesures pour les deux autres enroulements primaires de TR (2S1 - 2S2 et 3S1 - 3S2).

3.2. Essai N° 2.

On peut utiliser ce relais pour effectuer une protection différentielle sur un réseau triphasé.

- ☞ Réaliser le montage de la **Figure 4.2**.
- ☞ Dans ce cas les deux côtés du transformateur sont connectés en étoile en même temps.
- ☞ Établir une tension nominale au secondaire du transformateur.
- ☞ R_{ch} est initialement ajustée à 20%.

- I_{d1} est fixé à **10%**, cela donne une grande sensibilité au relais, la détection du courant différentiel entre le côté primaire et secondaire, est obtenu en diminuant le courant du secondaire par l'augmentation de R_{ch} .

Quelle est la réponse du relais ?

.....

- Maintenant ajuster les deux paramètres de déclenchement I_{d1} et I_{d2} à **32,5%** et la R_{ch} à une valeur qui permettra la circulation d'un courant de **1(A)** sur le côté primaire du TR, tester dans ce cas la réponse du relais pour les défauts suivants:



- ▶ Court-circuit entre deux phases (**connecter 2U₁ avec 2V₁**)

Résultats:

.....
.....

- ▶ Défaut à la terre (**connecter 2U₁ avec N**) toujours le secondaire est en étoile

Résultats:

.....
.....

- ▶ défaillance d'un transformateur de mesure (**connecter 4S₁ avec 4S₂**)

Résultats:

.....
.....

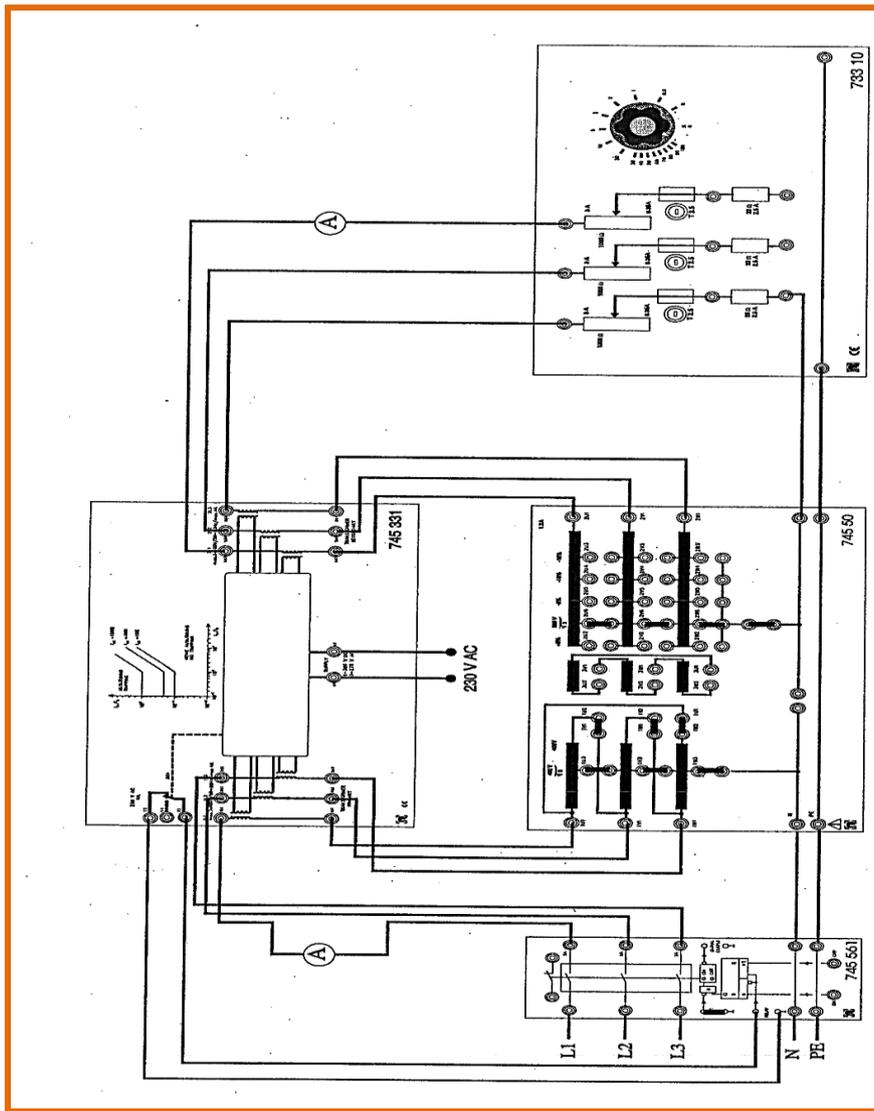


Figure 4.2. Réponse du relais différentiel pour plusieurs défauts.



TP N°5 : Relais de tension (Maximum et minimum de tension)

1. Objectif

Les buts visés par cette expérience sont multiples :

- ☞ Savoir faire le branchement correct des relais de tension dans un réseau ou une installation électrique.
- ☞ Régler et déterminer les différentes caractéristiques du relais de sous tensions et du relais de surtension.
- ☞ Visualiser le phénomène de coupure quand la tension du réseau atteint le seuil de réglage du relais de tension.

2. Rappel théorique

Un relais de surveillance est installé pour surveiller le réseau électrique contre les défauts de chute de tension, minimum de tension et les surtensions, afin d'éviter toutes conséquences majeures.

C'est un relais triphasé qui permet de comparer la tension du système avec la tension de référence réglée sur lui-même (dans notre relais cette tension est de valeur 380 V) entre deux phases.

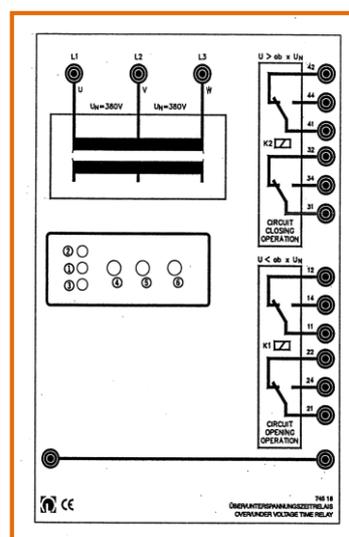


Figure 5.1. Relais de tension



Les contacts de K1 sont utilisés pour la sous-tension sur les bornes (11, 12, 14 et 21, 22, 24)

Les contacts de K2 sont utilisés pour la surtension sur les bornes (31, 32, 34 et 41, 42, 44)

La puissance maximale consommée par ce type du relais est de 6 VA lorsque la tension atteint la valeur $1,3 \cdot U_N$.

3. Matériels nécessaires

N°	Désignation	Reference	Nbre	Observations
01	Relais de tension triphasé	745 18 ou 745 181	01	sa propre alimentation est de 230 V
02	Transformateur triphasé, couplage triangle-étoile avec prises de réglage de tension	745 50	01	380/380, $S_{nom} = 790 \text{ VA}$ $U_2 = (-15, -10, -5, +5, +10) \% U_N$
03	Modèle d'une ligné aérien triphasée	745 51	01	$\ell = 360 \text{ Km}$, $R = 13 \Omega$ $L = 290 \text{ mH}$, $C_B = 5 \mu\text{F}$
04	Module de disjoncteur triphasé	727 50	01	
05	ampèremètre	727 32	01	$0 \div 2,5 \text{ A}$
06	voltmètre	727 38	02	$0 \div 600 \text{ V}$
07	Testeur sonneur ou de continuité		01	
08	Résistance variable	733 10	01	$0 \div 1000 \Omega$
09	chronomètre	313 031	01	

4. Manipulation

4.1. Essai N° 1. Relais de sous tension

- ☞ Réaliser le montage de la figure 5.2.
- ☞ Pour réaliser une sous tension, on peut se limiter sur l'intervalle de variation $0,7 \div 0,95 \cdot U_N$.
- ☞ Régler le relais à $U < U_N = 0,95$, $U > U_N = 1,05$ et $t = 0,5 \text{ (s)}$.
- ☞ Connecter l'indicateur acoustique pour le déclenchement du relais entre les bornes 11 ,12.
- ☞ Mettre la tension du secondaire du transformateur (cat .n°: 745 50) à $U_N - 5\%$.



- ☞ La charge (cat .n°: 745 10) est initialement réglée à 100% , permet d'effectuer un courant très faible lors de la mise en service de l'installation.
- ☞ Faire diminuer la tension du réseau en augmentant progressivement le courant par la diminution de la résistance de la charge R_{ch} jusqu'à ce que le relais enclenche, autrement dit il fonctionne (ouverture du contact entre 11 et 12).
- ☞ Reporter les mesures des tensions correspond au fonctionnement et au retour du relais pour plusieurs niveaux de tension (tensions inférieurs à 380 v).

Tableau 5.1

$U < U_N$	0,90	0,925	0,95	0,975
U_f (tension de fonctionnement du relais)	.....	.....	.....	.....
U_r (tension de retour)	.....	.....	.....	.....
Rapport de réinitialisation = U_r / U_f	.....	.....	.....	.....

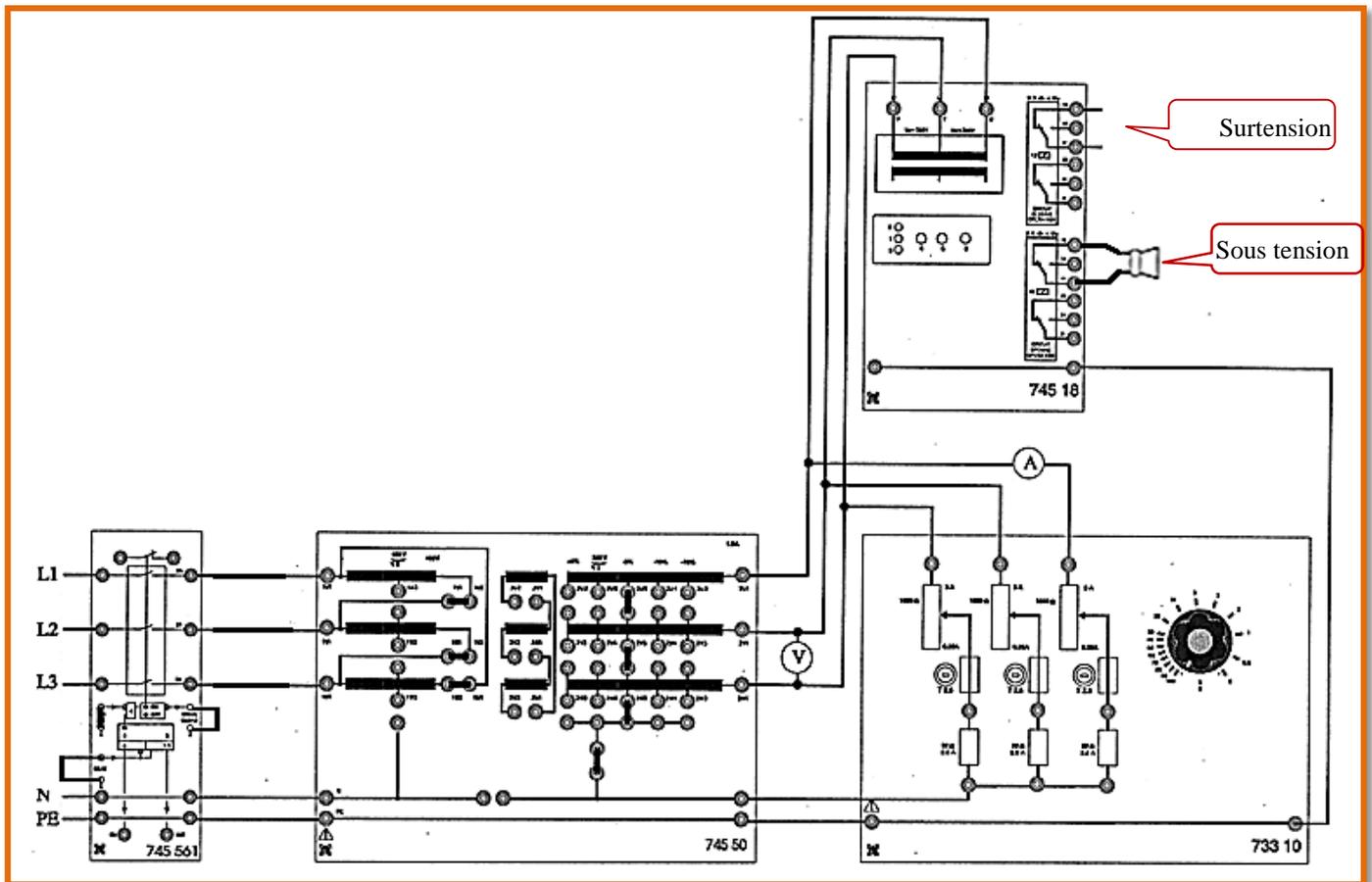


Figure 5.2. Réponse d'un Relais de tension

4.2. Essai N° 2. Relais de surtension

- ☞ Mais pour la surtension on se limite la variation sur l'intervalle $(1,05 \div 1,3) \cdot U_N$.
- ☞ Utiliser le même montage de la **figure 5.2**, en plaçant l'indicateur acoustique sur les bornes **31 et 34**.
- ☞ $U = U_N$ (tension secondaire du TR).
- ☞ Remettre le curseur de la résistance de charge entre $15 \div 20\%$.
- ☞ Faire augmenter la tension aux borne de la charge, soit par l'augmentation de R_{ch} , si ce n'est pas possible, on peut recourir à:



- Augmenter la tension au niveau du transformateur (+5%, +10%.....).
- Ou bien, introduire la ligne électrique en régime à vide avec capacité (élévation de tension par effet capacitif de la ligné) jusqu'au fonctionnement du relais (ouverture du contact entre les bornes **31 et 34**).
- ☞ Et puis diminuer cette tension pour que le relais revient à sa position initiale (retour).
- ☞ Porter les mesures sur le tableau 3.2 pour plusieurs surtensions.

Tableau 5.2

$U > U_N$	1,05	1,075	1,1	1,125
U_f (tension de fonctionnement du relais)	....	.....	....	...
U_r (tension de retour)	.....	.....	....	.....
Rapport de réinitialisation = U_r / U_f	...	.....	.....	.....

4.3. Essai N° 3. Temporisation des relais de tension

- ☞ Cette expérience montre la temporisation de protection dans les systèmes énergétiques, pour ce faire on utilise le dispositif (cat .n°: 313 031) qui est un dispositif (electronic stopclock) qui permet de mesurer le temps d'intervention du disjoncteur (cat .n°: 745 561).
- ☞ Réaliser le montage de la figure 5.3 et répéter quelques mesures de l'essai N°1 et N°2.
- ☞ Pour introduire la temporisation et regarder le retard de fonctionnement des relais on utilise la temporisation en variant le temps $t = 0 \div 5$ (s).

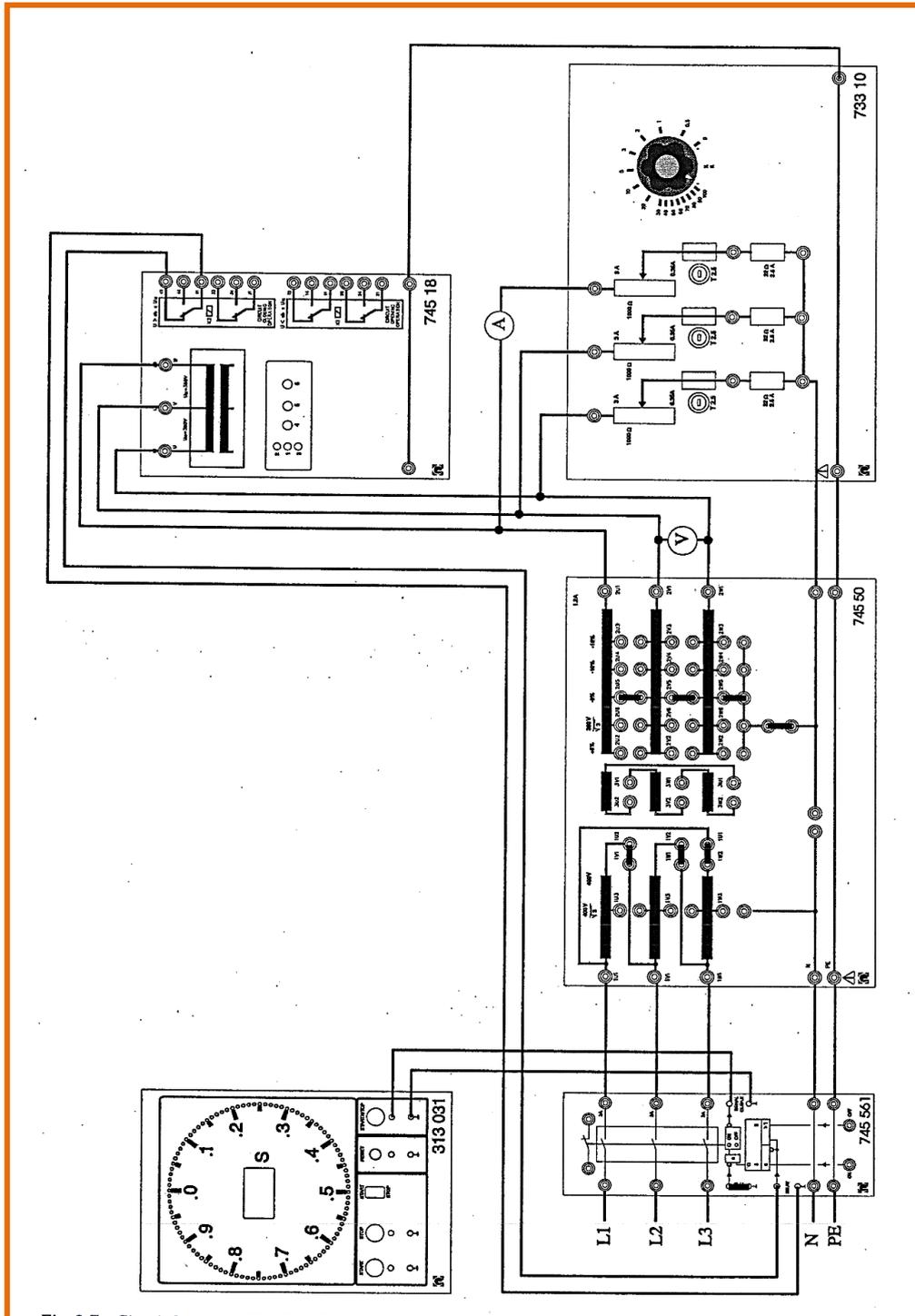


Figure 5.3. Circuit pour mesurer le temps d'enclenchement des relais (Maximum et minimum de tension).



TP N°6 : Réducteurs de mesure (TC et TP)

I. Transformateur de courant monophasé (TC)

1.1. Objectif

- ☞ Maitriser le fonctionnement et le branchement du TC
- ☞ Savoir Déterminer les caractéristiques du TC
- Son rapport de transformation
- Son erreur de courant.

1.2. Rappel théorique.

Les transformateurs de courant sont constitués d'un circuit magnétique en forme de tore. Le primaire est constitué de n_1 spires et peut se réduire à un simple conducteur traversant le tore ($n_1=1$). Le secondaire est bobiné en n_2 spires de façon régulière autour de ce tore.

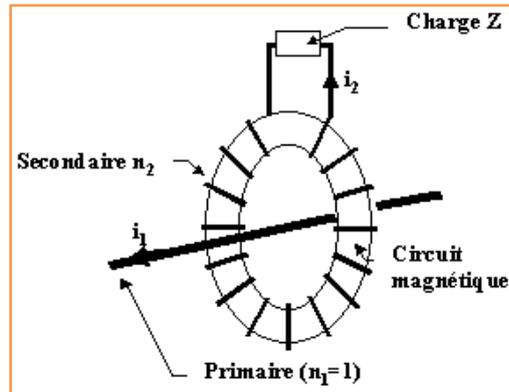


Figure 6.1. Circuit d'un transformateur de courant

$$K_N = \frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (6.1)$$

K_N : rapport de transformation du TC

I_1 : courant traversant l'enroulement primaire

I_2 : courant traversant l'enroulement secondaire



n_2, n_1 : nombre de spire du secondaire et du primaire respectivement.

- ☞ Le courant secondaire I_2 est généralement égale soit 1 ou bien 5 (A)
- ☞ Le rapport est donné généralement sous forme de fraction : exemple : 500:5 - 100:1 - 1000:5
1000:1.
- ☞ Pour un TC parfait, le courant primaire est exprimé par : $I_1 = I_2 \cdot K_N$
- ☞ La déviation du courant secondaire est appelée erreur de courant, elle est donnée par la relation suivante :

$$F_i(\%) = \frac{I_2 \cdot K_N - I_1}{I_1} \cdot 100 \quad (6.2)$$

Remarque: le secondaire du TC doit être toujours en court-circuit par une charge très faible et purement résistive, appelé la charge du transformateur de courant.

☞ Charge du TC

Cette charge du TC est constitué de deux résistances, l'une de $R = 0,56 \Omega$ avec un courant $I_{max} = 6,5 (A)$, et l'autre de résistance variable $R = 0 \div 56 \Omega$ de $I_{max} = 1 (A)$ protégée par un fusible de 1(A).

Les transformateurs de classe 0,1 et 0,5 sont utilisés pour des mesures exactes puisqu'ils donnent des erreurs limitées entre 0,1 et 0,5 % mais ceux des classes de 1 et 5 sont suffisant et leurs erreurs sont de 1 et 5 %.

1.3. Manipulation

Essai N° 1

- ☞ Réaliser le montage de la figure 6.4.

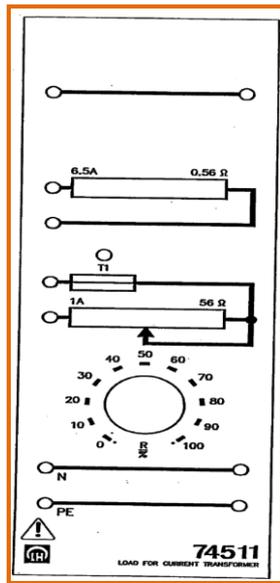


Figure 6.2. Charge du TC

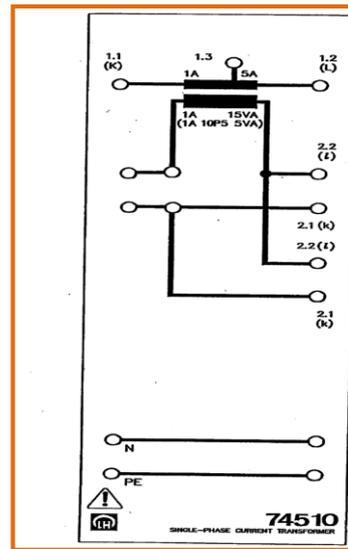


Figure 6.3. Transformateur de courant

- ☞ Pour un TC de $K_N = 1:1$ le primaire est branché entre les bornes 1.1(k) et 1.2(l)
- ☞ Pour un TC de $K_N = 5:1$ le primaire est branché entre les bornes 1.3(k) et 1.2(l)

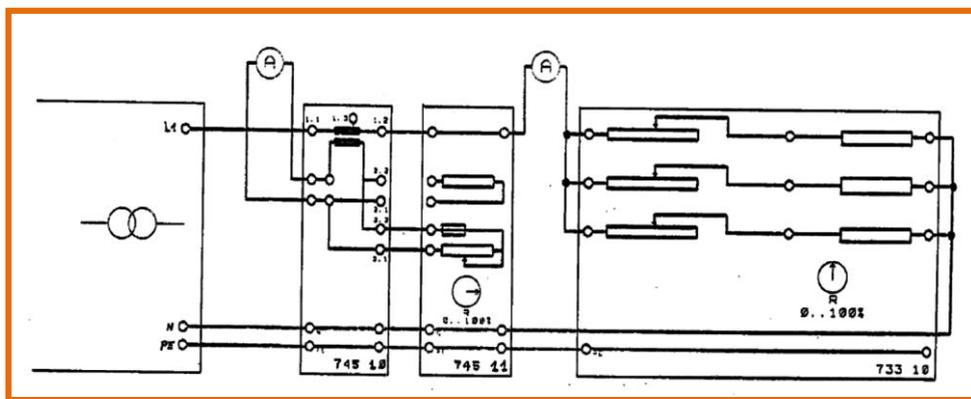


Figure 6.4. Circuit de mesure du rapport de transformation du TC pour différents courants primaires.

- ☞ Les trois résistances de la charge (Cat.N°.745 10) sont connectées en parallèle pour permettre à ce système d'admettre un courant maximum de $I = 9$ (A).
- ☞ Après contrôle du montage par l'enseignant, effectuer les manipulations suivantes:
- ☞ Connecter le transformateur de $K_N = 1:1$



- ☞ Faire varier le courant I_1 de $0,1 \div 1$ (A) avec un pas de $0,1$ (A), soit on augmente la tension d'alimentation, soit on diminue la résistance de la charge (éviter $R_{ch} = 0 \Omega$).
- ☞ Mesurer les valeurs de courants I_1 et I_2 .
- ☞ Remplir le tableau.6.1

Tableau.6.1

Courant primaire I_1 (A)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Courant secondaire I_2 (A)	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Erreur du courant (F_i)	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....

- ☞ Refaire les mesures pour un rapport de transformation du TC à $K_N = 5:1$
- ☞ Pour cela brancher le primaire du TC sur les bornes **1.3(k)** et **1.2(l)**, et prenez la charge du TC, $R = 0,56 \Omega$ de $I_{max} = 6,5$ (A)
- ☞ Mettre les mesures dans le tableau 6.2.

Tableau.6.2

Courant primaire I_1 (A)	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5
Courant secondaire I_2 (A)	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Erreur du courant (F_i)	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....

Questions

- ⌘ Déterminer l'erreur de courant pour chaque mesure de I_1 .
- ⌘ Quelle est la déviation maximale (F_i)?
- ⌘ Déterminer le rapport de transformation du TC pour les deux cas.
- ⌘ Pourquoi on ne laisse jamais le secondaire du TC ouvert?.



II. Transformateur de tension monophasé (TP)

2.1. Objectif

- ☞ Le fonctionnement et le branchement du TP
- ☞ Détermination des caractéristiques du TP
 - Son rapport de transformation
 - Son erreur de tension

2.2. Rappel théorique

Permet de réduire la tension élevée du primaire à une valeur très faible sur le secondaire. Ces transformateurs en système triphasé peuvent mesurer les tensions, soit entre deux phases, soit entre phase et neutre.

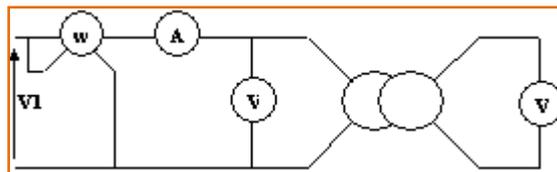


Figure 6.5. Circuit d'un transformateur de potentiel.

Le rapport de transformation du TP est donné par l'expression suivante;

$$K_N = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{U_P}{U_S} \quad (6.3)$$

Avec : U_{1N} : tension élevée du primaire

U_{2N} : tension basse du secondaire

Exemple : $K_N = 220.000/100$ V

- ☞ la déviation de la tension secondaire en pour cent est déterminée par :

$$F_u(\%) = \frac{U_2 \cdot K_N - U_1}{U_1} \cdot 100 \quad (6.4)$$



Ces transformateurs généralement de classes **0,2 -1** sont utilisés pour les mesures des tensions.

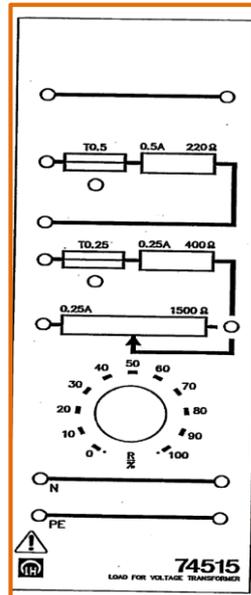


Figure 6.6. Charge du TP

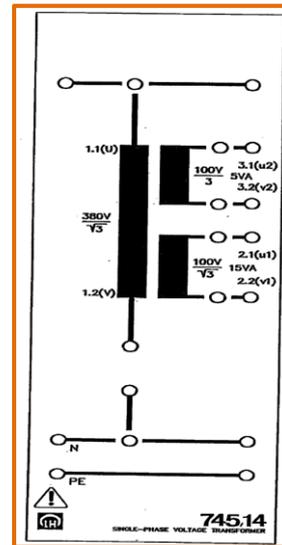


Figure 6.7. Transformateur de Potentiel

2.3. Manipulation

Essai N° 2

Réaliser le montage de la figure.6.8.

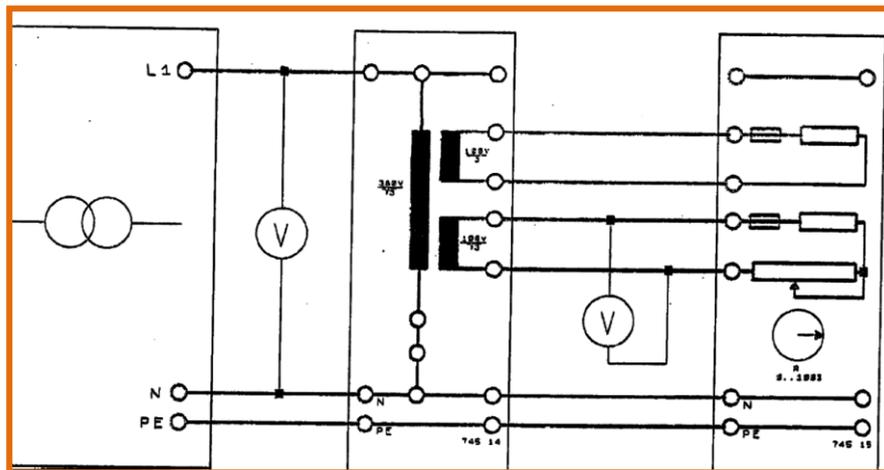


Figure 6.8. Circuit de mesure du rapport de transformation du TP pour différentes valeurs de U_{IN} et de charges de TP.



- ☞ Après vérification du montage par l'enseignant.
- ☞ le secondaire du TP ne jamais être en court-circuit.
- ☞ La charge (**Cat . N° .745.15**) du TP est initialement débranchée, augmenter la tension de la source de 20 V jusqu'à 220 V, avec un pas de 40 V.
- ☞ Mesurer les tensions des deux secondaires du TP; sur les bornes (**U 2.1-2.2**) et (**U 3.1-3.2**).
- ☞ Mettre les mesures dans le tableau 6.3.

Tableau 6.3

Tension d'alimentation U _{1.1-1.2}	20	60	100	140	180	200
U 2.1-2.2	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Erreur de tension F _{u2} %	.....	.....	.....	.....	.....	.....
U 3.1-3.2	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Erreur de tension F _{u3} %	.....	.....	.....	.....	.....	.....

- ☞ Pour étudier l'effet de la charge du TP sur le rapport de transformation et sur le même montage de la figure.6.8.
 - Sur les bornes (**3.1 - 3.2**) brancher la résistance fixe de **220 Ω**.
 - Et sur les bornes (**2.1 - 2.2**) brancher une résistance variable de **400 - 1500 Ω**.
 - Fixer la tension du primaire du TP à **220 V**, et mesurer les tension du secondaire du TP entre les bornes **U 2.1-2.2** pour différentes valeurs de La charge (**Cat . N° .745.15**).
 - Porter les mesures sur le tableau 6.4.

Tableau 6.4.

Charge de TP %	100	80	60	40	20	0
U 2.1-2.2	.....	.....	.....	.....	.....	.....

Questions

- ☒ Déterminer les rapports de transformation du TP.
- ☒ Déterminer la déviation pour chaque mesure.



Essai N°3

Détermination de la puissance nominale du transformateur de courant (TC), et l'influence de la charge du TC sur son courant secondaire :

☞ Réaliser le montage de la **figure 6.4**.

La charge nominale du transformateur de courant (TC) est de **5 VA** par exemple. **5 Ω**

à un courant nominal du secondaire du TC de **1 (A)**

☞ Régler la résistance de la charge du TC approximativement à cette valeur (**5 Ω**) et répète ce qui précède avec un **$K_N = 1:1$**

☞ Porter les résultats sur le tableau **6.7**.

Tableau 6.7.

Courant primaire $I_1(A)$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Courant secondaire $I_2(A)$	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Erreur de courant (F_i)%	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....

☞ Quelle est l'erreur maximale (F_i)% =?.

☞ Pour mieux représenter L'influence de la charge de TC sur le courant secondaire, on branche un voltmètre sur son secondaire qui indiquera une tension en fonction de cette charge pour un courant primaire constant. **$I_1 = 1 (A)$** .

1. Pour ce faire brancher un voltmètre entre les deux bornes (I et K) du secondaire du TC.
2. Et varier la charge du TC de **0 Ω** jusqu'à **56 Ω** avec un pas de **5 Ω**.
3. Mesurer la tension du secondaire bornes (I et K) en maintenant le courant **$I_1 = 1 (A)$** constant par la variation de tension d'alimentation ou bien par la variation de la résistance de la charge.
4. Mettre les mesures dans le tableau 6.8.

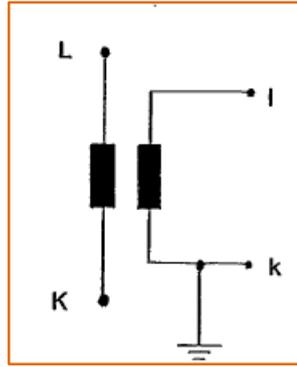


Figure 6.9. Symbole graphique d'un TC

Tableau 6.8.

Charge de TC (Ω)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	56
U_2 (entre I et K)	...	....	....	....	....	....	...	....	....	....	...	....

Essai N°4

☞ Réaliser le montage de la figure 6.10.

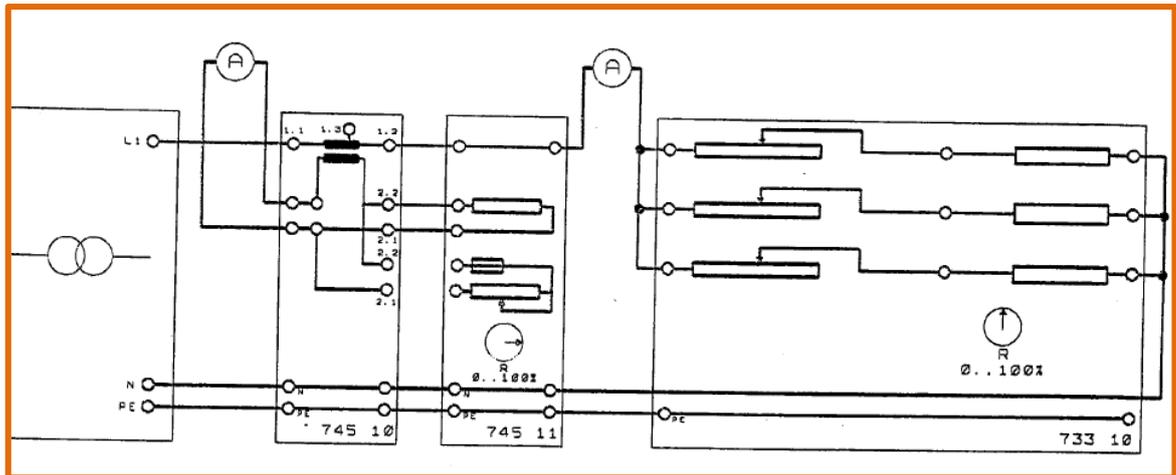


Figure 6.10. Circuit de détermination du comportement du TC à fort courant.



- ☞ Varier le courant I_1 de 1 (A) ÷ 6,5 (A) ; (pas de variation est de 1 (A)).
- ☞ Mesurer le courant secondaire I_2 .
- ☞ Remplir le tableau ci-dessous

Tableau 6.9.

Courant primaire I_1 (A)	1	2	3	4	5	6	6,5
Courant secondaire I_2 (A)	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Erreur de courant (F_i)%	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....

Questions

- ☒ Quelle est la valeur du courant lorsque le TC fonctionne à sa charge nominale et lorsque l'erreur est faible?.
- ☒ Quelle est la valeur du courant primaire qui correspond à une erreur maximale?.

NB: Appliquer l'équation $S = I^2 \cdot R$



III. Transformateur de courant triphasé

3.1. Objectif

- ☞ Ces deux organes permettent de mesurer les courants des trois conducteurs, ainsi que le courant sommaire (résultant) dans un système triphasé.
- ☞ Pour effectuer des mesures sur un transformateur de courant totalisateur et de démontrer le principe de la protection différentielle.
- ☞ TC de sommation est utilisé pour une protection différentielle contre les déséquilibres des systèmes triphasés.

3.2. Rappel Théorique

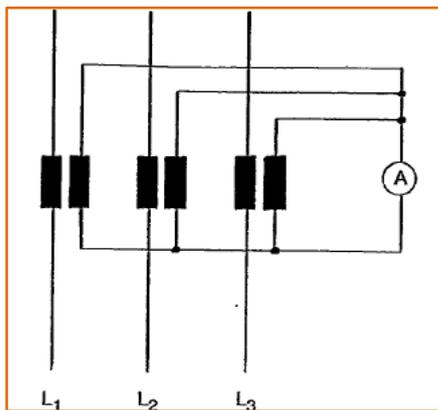


Figure 6.11. Système triphasé à trois TC pour mesurer les courants des trois conducteurs

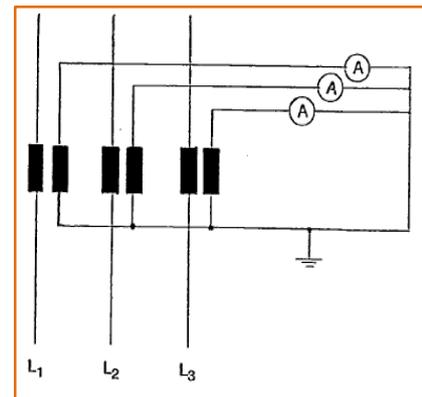


Figure 6.12. Circuit sommation de trois TC pour mesurer la composante homopolaire.

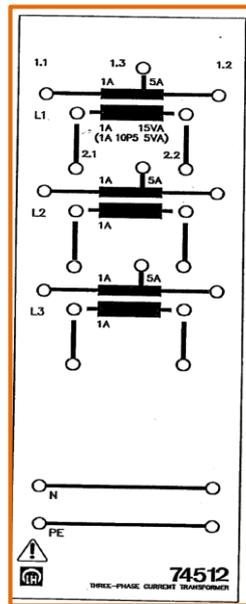


Figure 6.13. TC triphasé

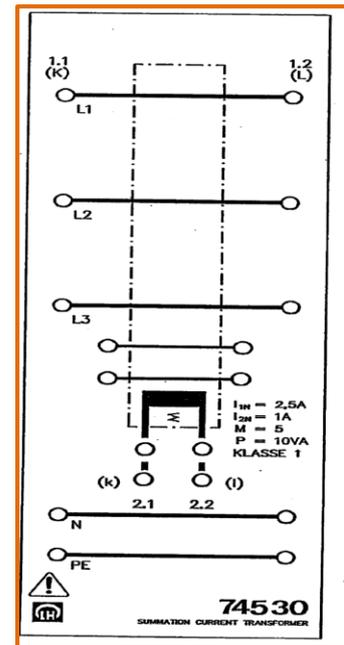


Figure 6.14. TC de sommation (totalisateur)

- ☞ TC de sommation a un rapport de transmission de **2,5 : 1** est conçu pour un courant nominal primaire de $I_{IN} = 2,5$ A, ce type de TC est de classe M1, présente une très bonne précision pour une charge nominale de **10 VA**.
- ☞ En plus de trois conducteurs de phase ce transformateur de courant a deux autres conducteurs sur son primaire dont l'un peut être utilisé pour le conducteur neutre en cas d'un système de 4 conducteurs.



Essai N°5

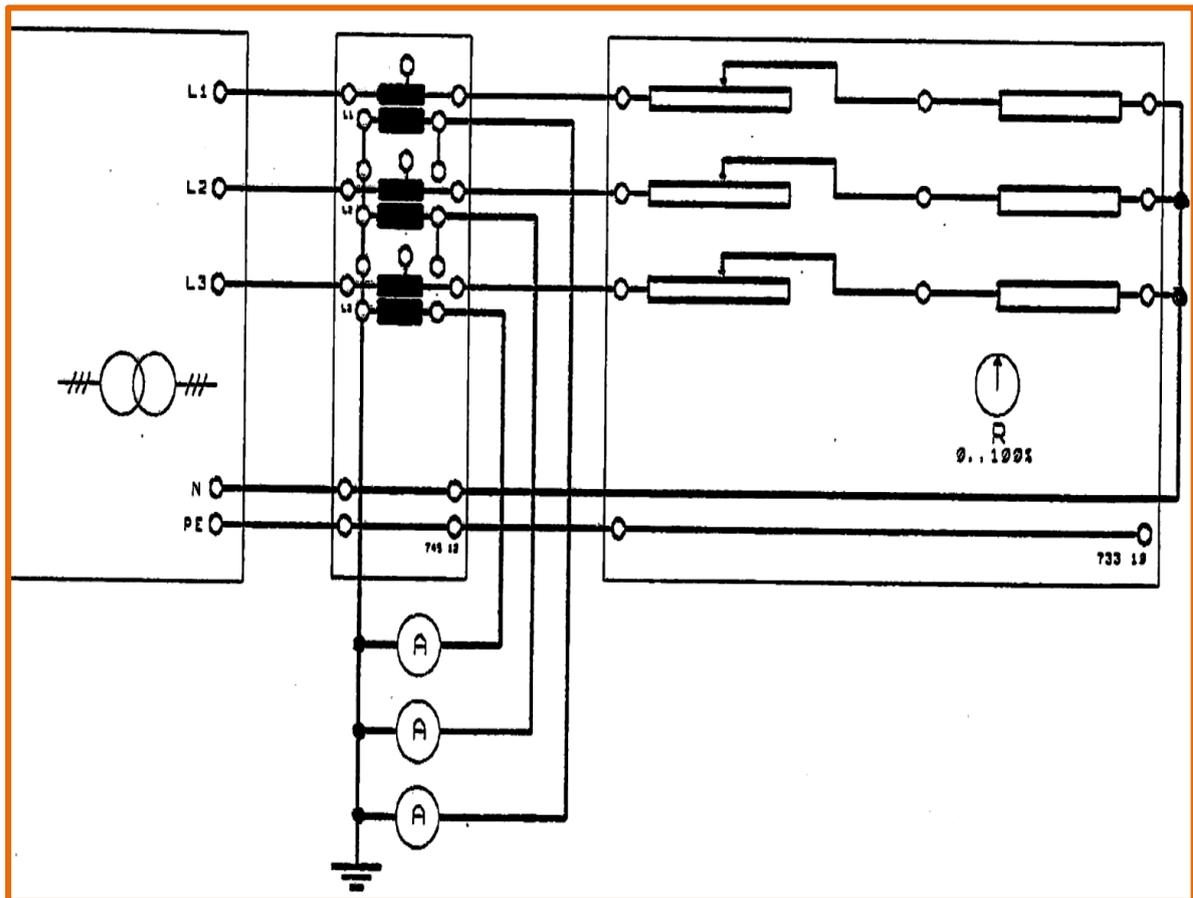


Figure 6.15. Circuit de mesure des courants secondaires d'un système triphasé

- ☞ Réaliser le montage de la figure 6.15.
- ☞ Mettre la tension secondaire à la valeur nominale.
- ☞ Mesurer les trois courants secondaires des TC pour plusieurs valeurs de résistance de charge, avec et sans neutre (neutre débranché).

Question

- ☞ Comparer les résultats trouvés?.



Essai N°6

Sur le même montage de la **figure 6.15.** et pour créer un système non équilibré. On branche la résistance de charge de TP (Cat . N°.745.15) en parallèle avec résistance une individuelle de charge du conducteur **L1**,

- ☞ Mettre la résistance de charge à **30 %** et la résistance de charge de TP à **50 %**.
- ☞ Mesurer les trois courants des conducteurs avec et sans neutre.
- ☞ Déconnecter le conducteur **L3** sur le côté secondaire du TC triphasé et répéter les mêmes mesures.

Question

- ☒ Comparer les résultats trouvés?.

Essai N°7

- ☞ Réaliser le montage de la figure 6.16.
- ☞ Mettre la tension du secondaire de transformateur de puissance à la tension nominale **380 V**.
- ☞ Relever le courant indiqué par l'ampèremètre (courant résiduel) pour plusieurs valeurs de résistance de charge avec et sans neutre.
- ☞ Modifier le montage de la figure 6.16. de telle sorte que l'une des trois lignes d'alimentation de la charge n'est plus connectée (charge asymétrique).
- ☞ Régler la **R_{ch}** à **50 %** et mesurer le courant sommaire avec et sans neutre.



TP N°7 : Protection différentielle par des transformateurs de courant

1. Objectif

Les buts visés par l'étude des relais à maximum de courants sont multiples :

- ☞ Utiliser les réducteurs de mesures TC pour évaluer du courant résiduel siège d'un défaut électrique.
- ☞ Maîtriser le raccordement en étoile du transformateur de courant triphasé sur un réseau triphasé.
- ☞ Savoir lire les grandeurs primaires via des grandeurs images secondaires

2. Rappel théorique

Les dispositifs de protection ou de mesure nécessitent de recevoir des informations sur les grandeurs électriques des matériels à protéger. Pour des raisons techniques, économiques et de sécurité, ces informations ne peuvent pas être obtenues directement sur l'alimentation haute tension des matériels, il est nécessaire d'utiliser des dispositifs intermédiaires dénommés réducteurs de mesure ou capteurs.

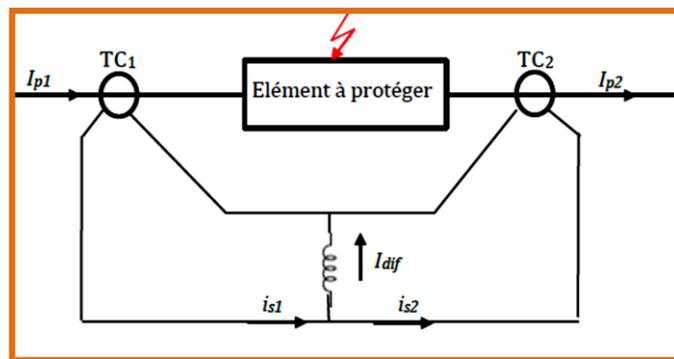


Figure 7.1. Principe d'une protection différentielle par des TCs.

$$I_{diff} = i_{s1} - i_{s2} \quad (7.1)$$

Avec i_{s1} ; courant secondaire du TC₁ et i_{s2} ; courant secondaire du TC₂

$$I_{diff} = I_{\Delta} = i_{s1} - i_{s2} \quad (7.2)$$



Cette protection différentielle fonctionne lorsque I_{Δ} ; dépasse 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).

3. Matériels nécessaires

N°	Désignation	Reference	Nbre	Observations
01	Transformateur de courant triphasé	745 12	01	/
02	Transformateur de courant sommaire	745 30	01	/
03	Alimentation triphasée variable avec disjoncteur	72675	01	/
04	Disjoncteur modulaire pour coupure en charge.	745 561	01	/
05	Relais à maximum de courant monophasé à temps constant	745 291	01	/
06	ampèremètre	727 31	03	0 ÷ 1 A
07	ampèremètre	727 32	03	0 ÷ 2,5 A
08	voltmètre	727 38	01	0 ÷ 100 V
09	Résistance variable	733 10	01	0 ÷ 1000 Ω

4. Manipulation

- ☞ Pour mesurer la composante homopolaire du courant d'un système triphasé pour une charge résistive.
- ☞ Réaliser le montage de la figure 7.1
- ☞ Mettre la tension de secondaire du transformateur de puissance (alimentation) à sa valeur nominale 380 V.
- ☞ Ajuster la résistance de la charge jusqu’ à ce que le courant absorbé atteigne la valeur $I_1 = 0,8$ A.
- ☞ Relever les courants primaires et secondaires du TC ainsi que le courant total indiqué par l'Ampèremètre A_t connecté sur les secondaires du TC pour une charge symétrique, avec et sans neutre.
- ☞ Porter les mesures sur le tableau 7.1

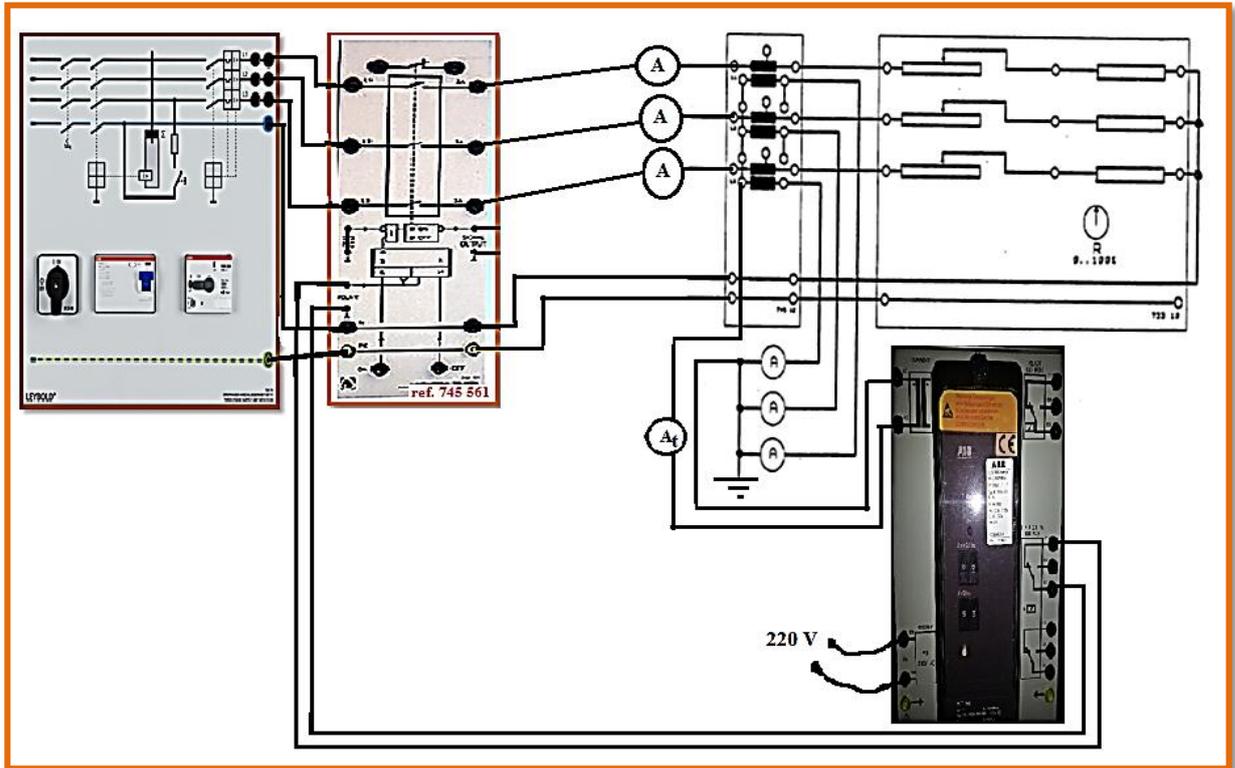


Figure.7.1. Circuit de mesure de la composante homopolaire

Tableau 7.1

Courants (A)	I_{p1}	I_{p1}	I_{p1}	I_{s1}	I_{s1}	I_{s1}	I_t
Mesure 1
Mesure 2
Mesure 3
Mesure 4
Mesure 5

Remarque:

☞ Pour une charge symétrique :

Mesure 1 : avec une charge donnée $R_{ch} = \dots$ qui absorbe un courant de 0,8 A

Mesure 2 : avec une autre charge (varier la résistance de charge, en évitant $R_{ch} = 0$) dans ce cas un autre courant absorbé est regardé sur les trois primaires du TC.

☞ Pour une charge asymétrique

Mesure 3 : la phase L_1 est déconnectée du côté de la charge.



Mesure 4 et 5 : déséquilibrer la charge triphasée, en branchant une grande résistance (vous pouvez prendre (Cat. N°.745.15) une fois en parallèle et autre fois en série avec une branche de la résistance de charge R_{ch} soit sur la phase L_1 .

- ☞ Pour un système équilibré le courant total indiqué par l'ampèremètre A_t est nul, le relais à maximum de courant ne détecte aucun courant résiduel, et aucun signal de coupure n'envoi au disjoncteur.
- ☞ Pour un système déséquilibré, un courant résiduel non nul, et la protection fonctionne selon le seuil de réglage du relais et en fonction de la temporisation.
- ☞ On peut effectuer plusieurs défauts de dissymétrie du système, et chaque fois le réglage de la protection est devenu nécessaire.

Questions

- ☒ Comparez les résultats trouvés.
- ☒ Déduire le rôle du neutre dans les deux cas; système équilibrée et système non équilibré.
- ☒ Quel est le rôle de la temporisation dans une protection définie?.



TP N°8 : Comparaison entre les différents régimes de neutre.

1. Objectif

L'étude du régime du neutre permet de:

- ☞ Maîtriser le branchement des différentes connections du neutre avec la terre.
- ☞ Permettre la prévision du parcours des courants de défaut et d'évaluer, avec précision suffisante leur grandeur.
- ☞ Mesurer et analyser la variation des paramètres du régime (tensions et courants) pendant l'apparition d'un défaut de court-circuit.
- ☞ Déterminer les avantages et les inconvénients de chaque type de mise à la terre.
- ☞ Résoudre les problèmes de la protection des personnes et des installations électriques.

2. Rappel théorique

2.1. Importance de régime du neutre

Physiquement le neutre est le point commun de trois enroulements montés en étoile, dans une installation électrique moyenne ou basse tension (MTA, MTB, BT) le neutre peut ou non être lié à la terre. On parle alors de régime du neutre.

Dans un réseau le régime du neutre joue un rôle très important. Lors de la mise accidentelle d'une phase à la terre, les valeurs prises par les courants de défaut et les tensions sont étroitement liées au mode de raccordement du neutre à la terre.

Les dispositifs de protection utilisés contre cette perturbation sont :

- Relais électromagnétiques
- Fusibles

2.2. Classification des régimes du neutre

Le choix du système de mise à la terre dans les réseaux à basse et moyenne tension dépend du type d'installation et du type de réseau. C'est aussi lié au type de charges et à la continuité de service requise.

On peut donc raccorder le neutre avec la terre en quatre types:



2.2.1. Neutre mis directement à la terre

Une liaison électrique est réalisée intentionnellement entre le point neutre et la terre. Il peut être représenté par le schéma de la figure 8.1.

Un neutre directement mis à la terre limite fortement les surtensions, mais provoque de très forts courants de défaut d'isolement.

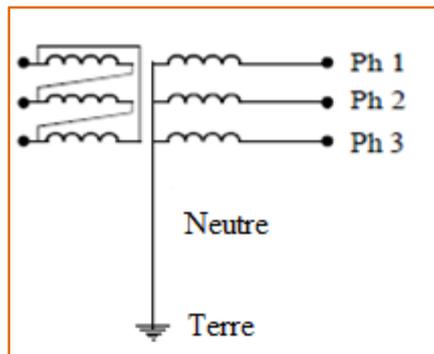


Figure 8.1. Neutre directement mis à la terre

En utilisant la méthode de composition (diagrammes vectoriels) pour la détermination de la valeur du courant de court-circuit monophasé entre la phase C et la terre (défaut franc à la terre), figure 1.2 dont le courant de défaut est représenté par $I_d = I_f$.

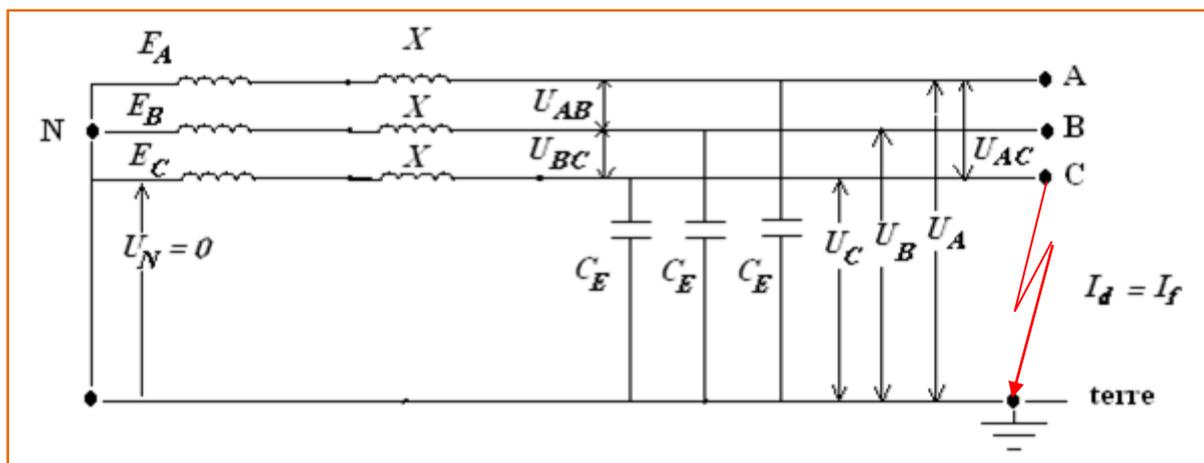


Figure 8.2. Défaut franc à la terre dans un neutre directement à la terre

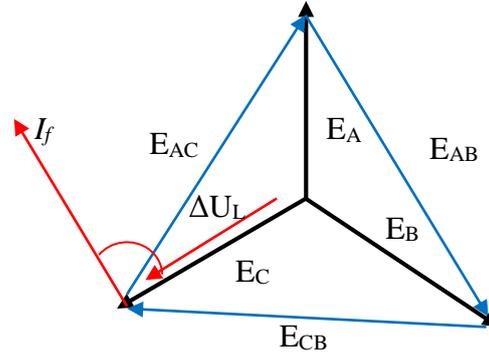


Figure 8.3. Diagramme vectoriel des tensions des phases pendant le défaut.

Au moment de défaut de court-circuit de la phase C avec la terre on a :

$$U_C = 0 = U_C - \Delta U_L ; \text{ Avec } \Delta U_L = E_C \quad (8.1)$$

$$U_{AB} = U_A - U_B ; U_{BC} = U_B - U_C = U_B ; U_{CA} = U_C - U_A = -U_A \quad (8.2)$$

et, $I_f = I_d = \left| \frac{E_C}{j.X} \right|$, avec X la réactance de la source et de la ligné (8.3)

2.2.2. Neutre isolé

Le neutre du réseau est physiquement isolé de la terre. Il existe cependant un lien virtuel constitué des réactances de capacité homopolaires transversales du réseau.

Les figures 8.4 et 8.5; représentent respectivement la connexion du neutre isolé et l'écoulement des courants, pendant un défaut accidentel de la phase C avec la terre.

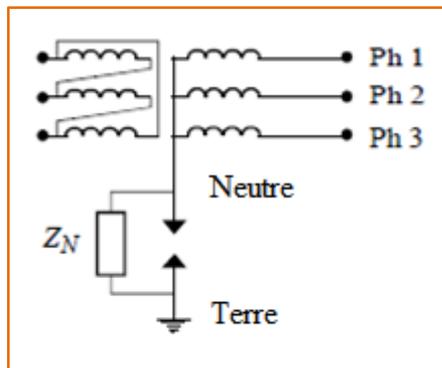


Figure 8.4. Neutre isolé

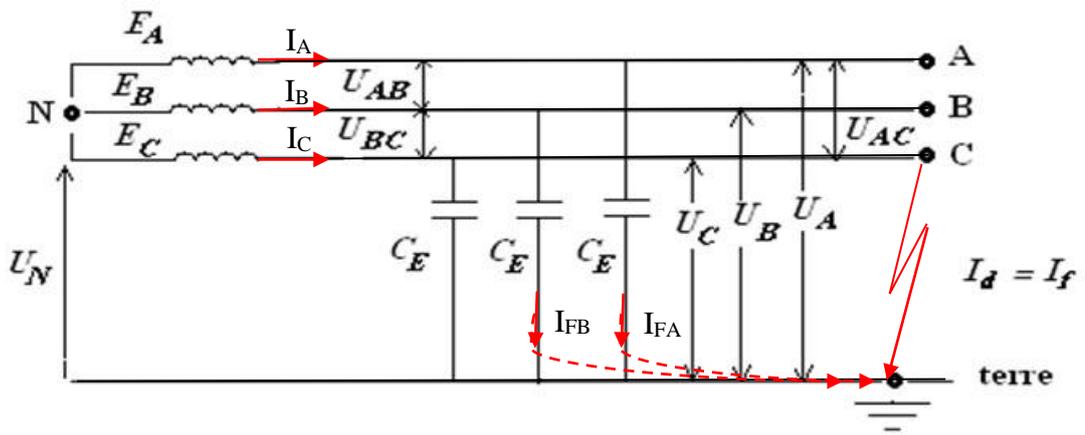


Figure 8.5. Défaut franc à la terre dans un neutre isolé.

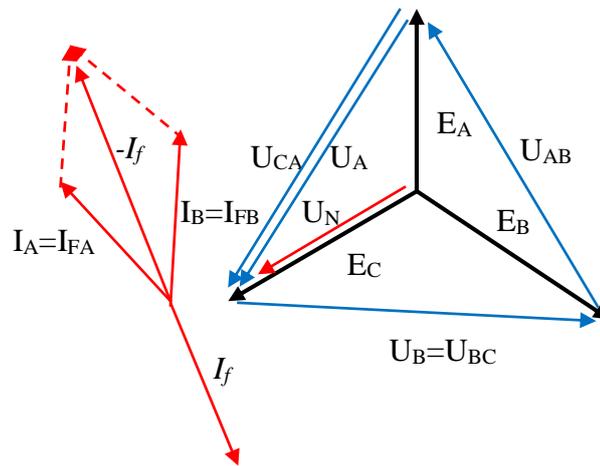


Figure 8.6. Diagramme vectoriel des tensions des phases pendant le défaut.

D'après le diagramme vectoriel on peut écrire;

$$U_C = E_C - U_N = 0 \Rightarrow E_C = E_N \quad (8.4)$$

$$U_A = E_A - U_N = E_A - E_C \quad (8.5)$$

$$U_B = E_B - U_N = E_B - E_C \quad (8.6)$$



Le courant peut être déterminé par l'expression suivante.

$$I_f + I_{FA} + I_{FB} = 0 \quad \Rightarrow \quad I_{FA} + I_{FB} = -I_f \quad (8.7)$$

Sachons que;

$$I_{FA} = j \cdot \omega \cdot C_E \cdot U_A \quad \text{et} \quad I_{FB} = j \cdot \omega \cdot C_E \cdot U_B \quad (8.8)$$

$$\text{Donc, } I_f = -j \cdot \omega \cdot C_E \cdot (U_A + U_B) \quad (8.9)$$

Où, U_A et U_B ; sont les tensions simples au moment du court-circuit de la phase C.

2.2.3. Neutre résistant

Une résistance R_N est connectée entre le point neutre et la terre comme le montre le schéma de la figure 8.7.

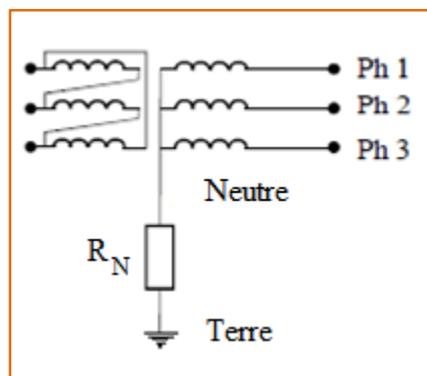


Figure 8.7. Neutre résistant

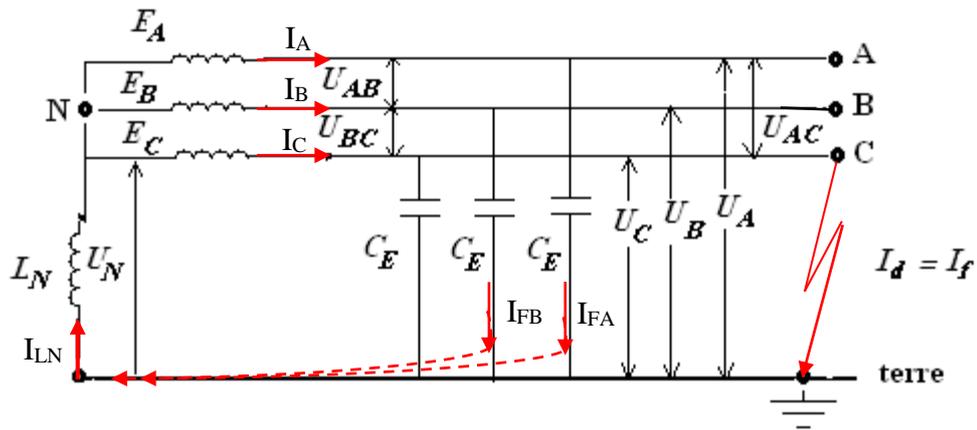


Figure 8.8. Défaut franc à la terre dans un neutre résistant

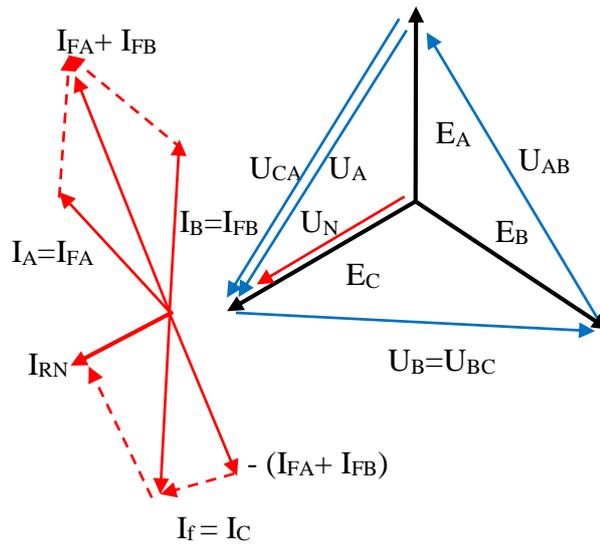


Figure 8.9. Diagramme vectoriel des tensions et des courants dans un neutre résistant.

En se basant sur le diagramme vectoriel de la figure 1.9, les courants peuvent s'exprimer par;

$$I_f = I_{RN} - I_{FA} - I_{FB} \quad (8.10)$$

$$I_{RN} = \frac{U_N}{R_N}, \quad I_{FA} = j \cdot \omega \cdot C_E \cdot U_A \quad \text{et} \quad I_{FB} = j \cdot \omega \cdot C_E \cdot U_B \quad (8.11)$$



$$I_f = \frac{E_C}{R_N} + 3j.\omega.C_E.E_C \quad (8.12)$$

Les équations (1.10) et (1.11) donnent;

$$-(I_{FA} + I_{FB}) = 3j.\omega.C_E.E_C \Rightarrow |I_f| = |E_C| \cdot \sqrt{\frac{1}{R_N^2} - 9.\omega^2.C_E^2} \quad (8.13)$$

Cette dernière équation (1.13) nous donne alors la valeur de I_f .

2.2.4. Neutre impédant

La mise en œuvre d'une impédance de compensation entre le point neutre du réseau et la terre permet de limiter l'amplitude du courant de défaut monophasé et de réduire le nombre de coupures brèves.

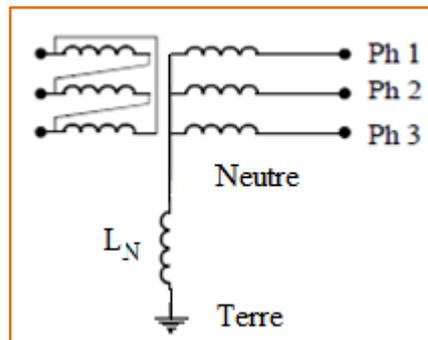


Figure 8.10. Neutre mis à la terre par une impédance.

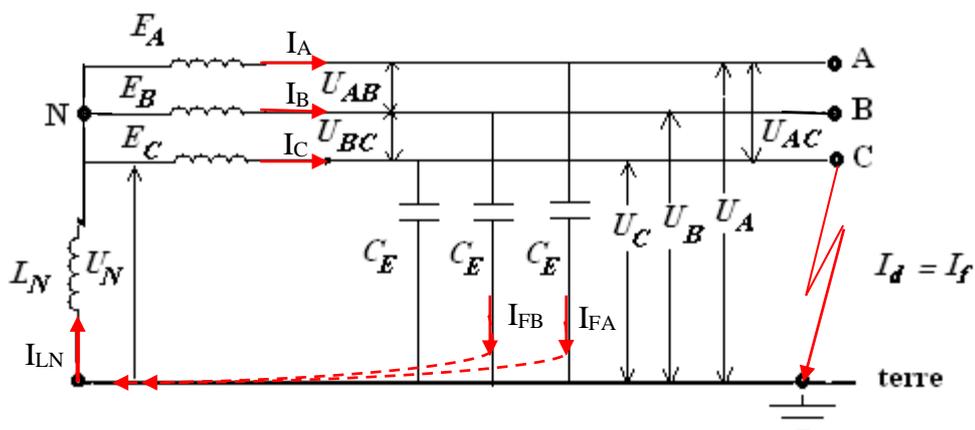


Figure 8.11. Défaut franc à la terre dans un neutre impédant.

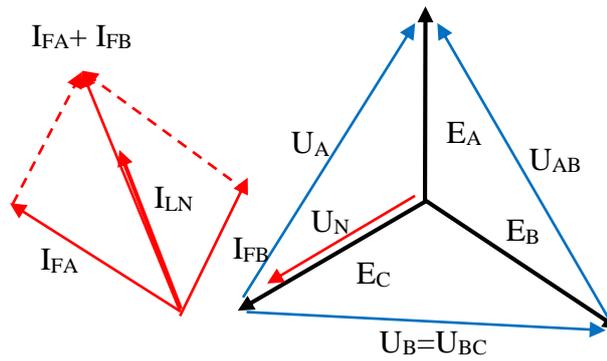


Figure 8.12. Diagramme vectoriel dans un neutre impédant.

$$I_f = I_{LN} - I_{FA} - I_{FB} \quad (8.14)$$

$$I_{FA} = j \cdot \omega \cdot C_E \cdot U_A \quad \text{et} \quad I_{FB} = j \cdot \omega \cdot C_E \cdot U_B \quad (8.15)$$

$$-(I_{FA} + I_{FB}) = 3j \cdot \omega \cdot C_E \cdot E_C \quad (8.16)$$

Remplaçons les valeurs des courants dans l'équation (1.14), on obtient;

$$I_f = \frac{-j \cdot E_C}{\omega \cdot L_N} + 3j \cdot \omega \cdot C_E \cdot E_C = E_C \cdot \left(3\omega \cdot C_E - \frac{1}{\omega \cdot L_N} \right) \quad (8.17)$$

NB. La bobine dite de Petersen doit être choisie de manière que le courant de défaut soit négligeable, en utilisant la condition;

$$I_f = 0 \Rightarrow 3\omega \cdot C_E = \frac{1}{\omega \cdot L_N} \Rightarrow \text{la bobine est d'inductance } L_N = \frac{1}{3\omega^2 \cdot C_E} \quad (8.18)$$



3. Matériels nécessaires:

N ^o	Désignation	Reference	Nbre	Observations
01	Disjoncteur triphasé commandé par des boutons poussoirs	74556	01	Alimentation de la bobine de commande = 24 V
02	Transformateur triphasé, couplage triangle-étoile avec prises de réglage de tension	74550	01	380/380, $S_{nom} = 790 \text{ VA}$ $U_2 = (-15, -10, -5, +5, +10) \% U_N$
03	Modèle d'une ligné aérien triphasée	74551	01	$\ell = 360 \text{ Km}$, $R = 13 \Omega$ $L = 290 \text{ mH}$, $C_B = 5 \mu\text{F}$
04	ampèremètre	72731	01	$0 \div 1 \text{ A}$
05	ampèremètre	72732	03	$0 \div 2,5 \text{ A}$
06	voltmètre	72738	01	$0 \div 600\text{V}$
07	Bobine de Petersen réglable	74557	01	$0 \div 2000 \text{ mH}$
08	Résistance variable	73310	01	$0 \div 1000 \Omega$

4. Manipulation

- ☞ Réaliser le montage de la figure 8.13.
- ☞ Ne mettez pas le montage sous tension qu'après vérification et contrôle de l'enseignant chargé du TP.
- ☞ le courant $I_f = I_{CC}$ qui circule lors de cet essai et les essais qui suivent dépasse le courant nominal du transformateur et de la ligne. C'est pour cela que les mesures doivent être relevées rapidement (pendant 30 seconde, pas plus).
- ☞ Respecter le travail demandé dans chaque essai.

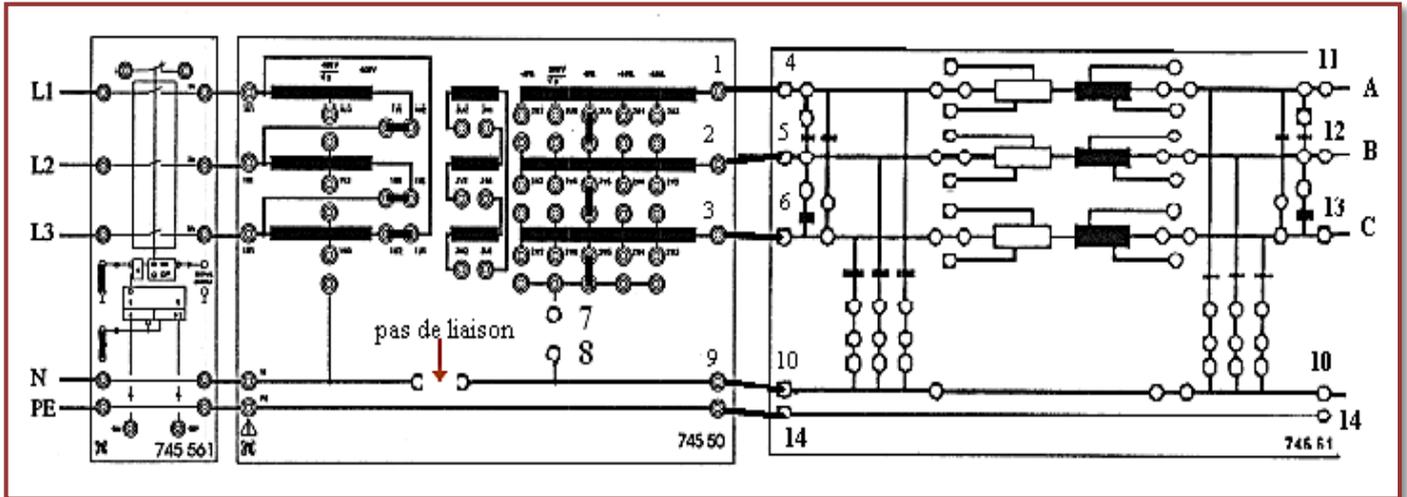


Figure 8.13. Montage à réaliser

4.1. 1^{er} Essai: Comportement d'une ligne en cas d'un C.C monphasé avec un neutre isolé

- Monter le schéma de la figure 8.13
- Enlever la fiche de connexion liant les bornes 7 et 8 (neutre isolé)
- Effectuer les mesures suivantes en deux régimes :

a- à vide, mesurer toutes les tensions simples et composées

b- Réaliser un court-circuit monphasé, en branchant un ampèremètre entre la phase C et la terre, (entre la borne 10 et 13), mesurer toutes les tensions à la fin de la ligne et le courant de défaut I_{CC} indiqué par l'ampèremètre.

- Mettre les résultats dans le tableau suivant.

Tableau 8.1

Tension en [V]	U_A	U_B	U_C	U_{AB}	U_{BC}	U_{AC}	Courant de défaut I_{CC} [A]
Régime de marche à vide
Régime de c.c

Analyse des résultats :

- ⊗ Comparer les tensions de marche à vide avec celles du régime de court-circuit.
- ⊗ Comparer le courant I_{CC} mesuré et calculé à partir de l'expression $I_{CC} = 1,73 \cdot U \cdot \omega \cdot C_E$.



4.2. 2^{ème} Essai: Comportement d'une ligne en cas d'un C.C monophasé avec un neutre mis directement à la terre

- Garder le même montage, et connecter les bornes **7-8** par la fiche de connexion.
- Après la vérification brancher l'alimentation.
- Mesurer toutes les tensions simples et composées ainsi que le courant de défaut **I_{CC}**, mettre les résultats dans le tableau suivant:

Tableau 8.2

Tension en [V]	U _A	U _B	U _C	U _{AB}	U _{BC}	U _{AC}	Courant de défaut I _{CC} [A]
Régime de marche à vide
Régime de c.c

Analyse des résultats :

- ✎ Comparer le courant I_{CC} mesuré à celui calculé.
- ✎ Comparer les tensions simples et composées à celles du tableau 8.2.

4.3. 3^{ème} Essai: Comportement d'une ligne en cas d'un C.C monophasé avec un neutre mis à la terre par réactance.

- Modifier le montage précédent, en branchant maintenant une bobine de réactance (bobine de Petersen) **réf :745 57** entre les deux bornes **7 – 8**

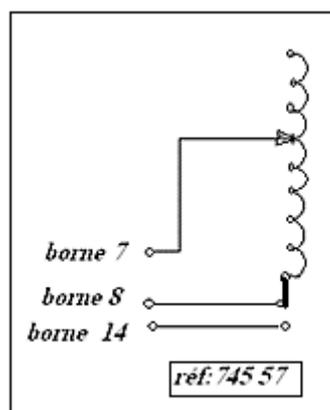


Figure 8.14. Bobine de Petersen

- Mettre la prise de la bobine L= 2000 mH
- Après la vérification brancher l'alimentation.



- Mesurer toutes les tensions simples et composées pour chaque valeur de L
- Mettre les résultats dans le tableau suivant:

Tableau 8.3

Tension en [V]	U_A	U_B	U_C	U_{AB}	U_{BC}	U_{AC}	Courant de défaut I_{CC} [A]
L [mH]							
500							
605							
720							
980							
1125							
1280							
1445							
1680							
1805							
2000							

Analyse des résultats:

- ✎ Tracer la courbe $I_{CC} = f(L_N)$.
- ✎ Déterminer la valeur de l'inductance L_N qui correspond au courant minimal de défaut (à partir de la courbe).
- ✎ Comparer la valeur trouvée avec celle calculée d'après l'équation (8.18).

4.4. 4^{ème} Essai: Comportement d'une ligne en cas d'un C.C monphasé avec un neutre mis à la terre par résistance.

- Enlever la bobine de Petersen et placer à sa place la résistance de réf. 733 10.

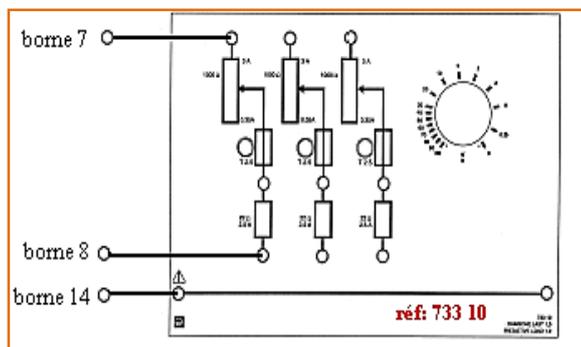


Figure 8.15. Résistance variable triphasé



- Choisir la valeur de la résistance d'après le calcul qui permet d'avoir un courant de court-circuit $I_{cc} = 1$ (A)
- Utiliser l'Ampèremètre réf. 727 32 dont $I = 0 - 2,5$ (A).
- Mesurer le courant de défaut $I_{CC} = I_d$, comparer le avec celui obtenu par le calcul ($I_{cc} = 1$ A).
- Relever la valeur de la résistance qui permet un courant de court-circuit $I_{CC} = 1$ A.

4.5. 5^{ème} Essai: Réalisation d'un C.C biphasé avec un neutre isolé

- Enlever la fiche de connexion entre les bornes 7 et 8 et brancher l'ampèremètre de calibre 2,5 A entre les deux bornes 12-13 (court –circuit biphasé entre la phase B et C).
- Après la vérification mettre le montage sous tension.
- Mesurer rapidement le courant de défaut indiqué par l'ampèremètre ainsi que toutes les tensions.
- Mettre les résultats dans le tableau suivant.

Tableau 8.4

Tension en [V]	U_A	U_B	U_C	U_{AB}	U_{BC}	U_{AC}	Courant de défaut I_{CC} [A]
Régime de neutre isolé
Régime de neutre mis à la terre

4.6. 6^{ème} Essai: Réalisation d'un C.C biphasé avec un neutre mis à la terre

- Brancher la fiche de connexion entre les bornes 7-8.
- Après la vérification mettre le montage sous tension.
- Mesurer les tensions et le courant de défaut I_{cc} .
- Mettre les résultats dans le tableau 8.4.
- Comparer les résultats trouvés avec celles trouvés dans le 5^{ème} Essai.



4.7. 7^{ème} Essai: Réalisation d'un C.C biphasé à la terre avec un neutre isolé

Suivez attentivement les procédures suivantes.

- Enlever la fiche de connexion entre les bornes 7-8.
- Brancher trois ampèremètres entre les bornes 10-12-13 d'après la figure ci-dessous.
- Après contrôle et vérification de l'enseignant, mettre le montage sous tension.
- Mesurer toutes les tensions et les courants I_B , I_C , I_f , porter les résultats sur le tableau 1.5.

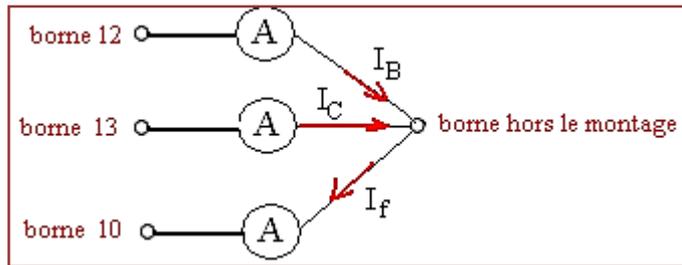


Figure 8.16. Schéma de branchement des ampèremètres

Tableau 8.5

Tension en [V] CC biphasé à la terre	U_A	U_B	U_C	U_{AB}	U_{BC}	U_{AC}	I_B (A)	I_C (A)	I_f (A)
Régime de neutre isolé
Régime de neutre mis à la terre

4.8. 8^{ème} Essai: Réalisation d'un C.C biphasé à la terre avec un neutre mis à la terre

- Dans ce cas on modifie le montage réalisé dans l'essai précédent, en reliant les deux bornes 7-8 par une fiche de connexion.
- Mesurer toutes les tensions et les courants, et les mettre dans le Tableau 8.5
- Comparer les courants à ceux calculés.
- Comparer ces dernières mesures avec celles du 7^{ème} essai.



☞ Remarque

Le courant de court-circuit triphasé est plus grand que celui de court-circuit biphasé $I_{CC(2)} / 0,85 = I_{CC(3)}$, ce qui est difficile de le réaliser pour des raisons de sécurité des matériels pédagogiques utilisés.

Questions

- ☞ Après l'analyse des résultats, préciser le régime du neutre qui donne un courant de court-circuit monophasé plus faible?
- ☞ Préciser le régime du neutre qui provoque des surtensions (les tensions simples en court-circuit, deviennent plus grandes ou aux voisinages des tensions composées)?
- ☞ Trouver, à partir de l'étude théorique, les avantages et les inconvénients de chaque régime de neutre et leurs applications?.



Références Bibliographiques

- [1] J. Lewis Blackburn, "Protective Relaying", Principles and Applications, Second Edition.
- [2] C. Prévé, "Protection of Electrical Networks", First published in Great Britain and the United States in 2006 by ISTE Ltd.
- [3] H. Lee, Muhammad H. Rashid, "Protective Relaying Principles and Applications", Third Edition, 2006 by Taylor & Francis Group, LLC.
- [4] A. Sastre, " protection des réseaux HTA industriels et tertiaires, cahier technique N°.174.
- [5] M. Juan. Gers and Edward J. Holmes, "Protection of Electricity Distribution Networks", 2nd Edition, Published by The Institution of Electrical Engineers, London, 2004.
- [6] F. Beloucif , "techniques de protection des réseaux électriques", supports de cours, 2014.
- [7] K. Bounaya, "Courts-circuits", polycopie de cours, O.P.U.G, 2016.
- [8] ENTEC, Manuel d'utilisation des équipements pédagogiques.