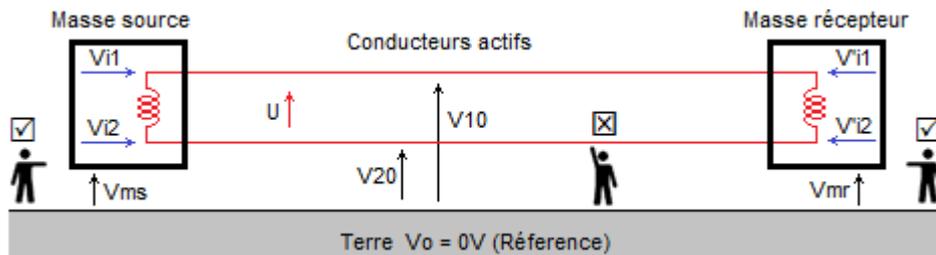


Schémas de liaisons à la terre (SLT) dans les installations basses tensions (BT)

1 Introduction

Théoriquement, toute installation électrique (ou réseau électrique) est principalement composée de trois groupes de conducteurs électriques isolés entre eux d'une façon à distinguer trois groupes de potentiel différents et indépendants.



Groupe de conducteurs	Potentiels du groupe	Accessibilité aux personnes
Conducteurs actifs (phases et neutre)	V_{10}, V_{20}, \dots	Inaccessibles ☒
Masses métalliques (châssis et enveloppes)	V_{ms} et V_{mr}, \dots	Accessibles ☑
La terre (commune à toute l'installation)	V_0 : pris comme référence $V_0=0V$	Accessible ☑

Figure 1 : Configuration générique d'une installation électrique montrant les trois groupes de potentiel indépendants

Une telle configuration favorise la continuité de service en cas de défauts d'isolement entre groupes, car l'isolation entre groupes empêche ou limite les courants de défauts à des valeurs très faibles ce qui ne nécessite pas la coupure d'alimentation. Cependant, la sécurité des personnes est en question, car le nombre (trois) de groupes de potentiels indépendants augmente le risque de subir des accidents électriques de graves conséquences (chocs électriques, électrisations, électrocutions).

L'amélioration de la sécurité des personnes peut se faire en diminuant le nombre de groupes de potentiel indépendants. Ceci se fait, au détriment de la continuité de service, par raccordement à la terre du groupe des masses (faire de la terre et des masses un seul groupe de potentiel), ce qui réduit le nombre de groupes indépendants en seulement deux groupes : groupe de conducteurs actifs et groupe des masses mises à la terre.

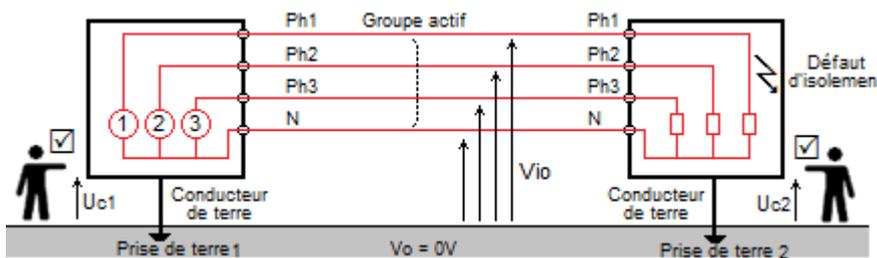
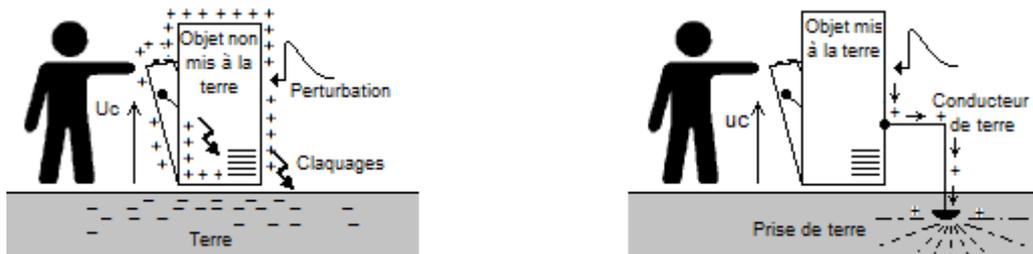


Figure 2 : Mise à la terre des masses pour améliorer la sécurité des personnes

En régimes normaux, sans défauts, aucun courant significatif n'est véhiculé par les mises à la terre, les masses sont alors au potentiel de la terre et il n'y a pas de tensions de contact ($U_{c1}=U_{c2}=0V$). Les personnes touchant les masses seront alors en sécurité. En cas de défaut entre le groupe actif et une masse ou la terre, il se peut qu'un faible courant de défaut se referme par les mises à la terre sans effets notables sur les potentiels des masses ($U_{c1}=U_{c2} \approx 0V$). Les personnes sont aussi en sécurité, mais l'isolation du matériel par rapport la terre ou la masse peut subir des contraintes de surtensions.

1.1 Prise de terre

Une prise de terre est une pièce ou ensemble de pièces conductrices enterrées nues et interconnectées à fin d'assurer un contact électrique efficace avec la terre. Les objets métalliques mis à la terre sont reliés à la prise de terre par un conducteur de terre. Ainsi, toute perturbation électrique accidentelle sur un objet mis à la terre s'évacue et s'épanouit dans la terre, ce qui évite l'élévation des potentiels et les claquages aux niveaux des objets. Les prises de terre sont alors une nécessité pour la protection des personnes et des matériels pour toutes les installations électriques.



Il existe de nombreuses technologies de réalisation de prises de terre dont les plus répandues sont :

- Plaques en Cuivre ou en Acier galvanisé, enterrées verticalement à au moins 1m du sol.
- Grilles et boucles à fond de fouille formées de conducteurs nus placés sous le sol, à au moins 1m
- Piquets ronds en Cu ou en acier galvanisé $\varnothing \geq 15\text{mm}$, de 1 à 2m enfouies verticalement dans le sol.

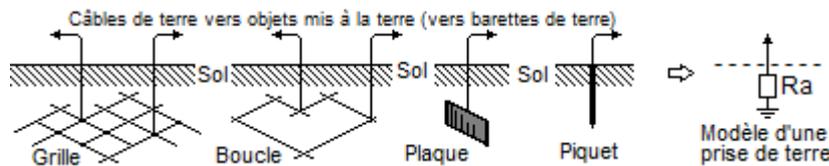


Figure 3 : Exemples de prises de terre et circuit équivalent

Une prise de terre est caractérisée par son impédance mesurée entre la borne du câble de terre et un point du sol lointain. En régimes établis, basses fréquences, cette impédance peut être réduite à sa résistance R_a . La qualité d'une prise de terre (résistance R_a aussi faible que possible) est essentiellement fonction de:

- La nature du sol matérialisée par sa résistivité électrique ρ_s (Ωm)
- La technologie de réalisation (forme, dimension et profondeurs des électrodes enterrées)

Formules pratique de calcul d'une prise de terre ; R résistances de la prise de terre en Ohm			
Piquet vertical	$R = \rho_s / L$	L : longueur du piquet en m	ρ_s résistivité du sol en Ohm.m
Conducteur horizontal	$R = 2\rho_s / L$	L : longueur du conducteur en m	
Plaque	$R = 0.8 \times \rho_s / L$	L : périmètre de la plaque en m	

1.2 Schémas de mise à la terre (SLT)

Anciennement appelés « Régimes du neutre », les SLT définissent les situations possibles du neutre et des masses d'une installation par rapport au potentiel de la terre. Ainsi, lors d'un défaut d'isolement, les courants et tensions résultants sont étroitement liées aux modes de liaisons à la terre du neutre et des masses. Ce qui permet de définir les conditions de protection contre les risques électriques résultants d'un défaut d'isolement. Les normes (CEI 60364 et NFC 15-100) définissent trois situations possibles d'une installation par rapport à la terre appelées « Schémas de liaisons à la Terre : SLT » nommés TT, TN et IT.

- La 1^{ère} lettre concerne la situation du neutre de la source par rapport à la terre (**T** pour neutre mis à la terre et **I** pour neutre isolé de la terre)
- La 2^{ème} lettre concerne la situation des masses métalliques des équipements par rapport à la terre (**T** pour masses mises à la terre et **N** pour masses mises au neutre).

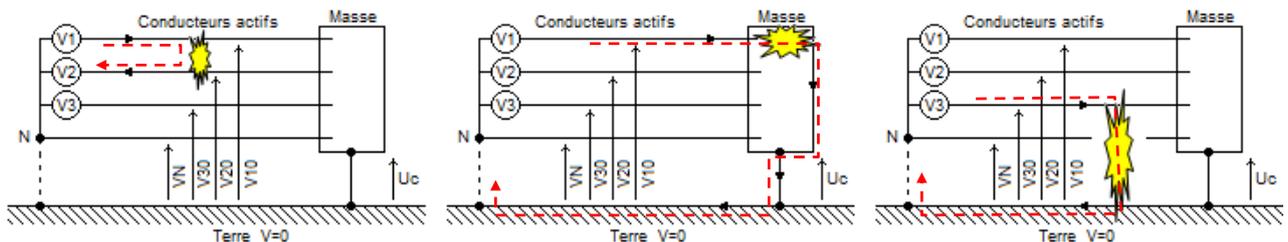
Dans tous les cas, les masses doivent être toujours reliées à la terre soit directement à travers une prise de terre (schémas TT et IT) soit à travers le conducteur neutre (schéma TN). Les trois SLT doivent procurer le même niveau de protection contre les conséquences de défauts d'isolement, mais pas forcément les mêmes niveaux de service, de maintenabilité et d'évolutivité.

2 Défauts d'isolement

Un défaut d'isolement est une liaison accidentelle entre conducteurs de potentiels différents suite à une défaillance dans leur isolation. Les conséquences, souvent dangereuses pour les personnes et les biens, dépendent à la fois du type des conducteurs en défaut et du schéma de mise à la terre (SLT) utilisé.

Selon les trois groupes de potentiel, on peut distinguer trois principaux types de défauts d'isolement

- Défauts entre conducteurs actifs (court-circuit mono, bi ou triphasé)
- Défaut entre conducteur actif et une masse (défaut à la masse)
- Défaut entre conducteur actif et la terre (défaut à la terre)



La règle fondamentale de la protection est de : « couper l'alimentation d'un circuit en défaut dès qu'il y a risques sur les personnes ou sur le matériel ». Les risques dépendent des courants et tensions développés dans les éléments de la boucle de défaut (*chemin emprunté par les courants de défaut*).

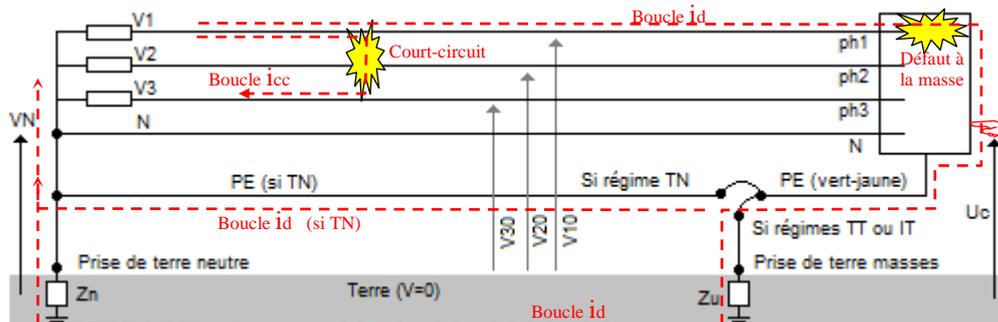


Figure 4 : Exemple de défauts d'isolement dans un schéma mis à la terre montrant les boucles de défauts

Le conducteur par lequel les masses sont reliées à la terre (ou au neutre) est appelé conducteur de Protection Equipotentiel (PE), il est de couleurs *vert-jaune* et ne doit pas être coupé ni porté de l'appareillage.

- Si le PE est relié à la prise de terre Ru, le schéma est TT (T : neutre à la terre, T : masse à la terre)
- Si le conducteur PE est relié au neutre, le schéma devient TN (T : neutre à la terre, N : masses au neutre)
- Si le PE est relié à la terre Ru, et $Z_n \rightarrow \infty$, le schéma devient IT (I : neutre isolé, T : masse à la terre)

On distingue trois types de défauts d'isolement : les courts-circuits, les défauts à la masse et les défauts à la terre, ces derniers ne seront pas traités ici, néanmoins ils ressemblent beaucoup aux défauts à la masse.

2.1 Défaits de court-circuit

Contacts accidentels entre conducteurs actifs (phases ou neutre) de très faibles impédances qui se traduisent par de fortes surintensités indépendantes des SLT: $i_{cc} = \frac{V_1 - V_2}{Z_{boucle_icc}} = \frac{U_{12}}{Z_{ph1} + Z_{ph2}}$

De conséquences très dangereuses pour le matériel : efforts électrodynamiques pouvant provoquer des déformations, échauffements excessifs pouvant provoquer des fusions et des incendies. *Il faut alors couper l'alimentation du circuit en défaut par les dispositifs de protection contre les surintensités.*

2.2 Défaut à la masse

Contacts accidentels entre un conducteur actif et la masse d'un équipement. Les courants résultants i_d dépendent des schémas de mise à la terre, car ils se referment par les éléments de mise à la terre (masses, conducteurs PE, prises de terre ...).

$$i_d = \frac{V_1}{Z_{boucle_id}} = \frac{V_1}{z_{ph1} + z_{pe} + Z_u + Z_n}$$

Ces courants sont limités par les impédances de la boucle de défaut. Les masses d'équipements se trouvent portées à des tensions de contact (U_c).

$$U_c = (z_{pe} + Z_u) \cdot i_d = \frac{(z_{pe} + Z_u) \cdot V_1}{z_{ph1} + z_{pe} + Z_u + Z_n}$$

Selon le mode de mise à la terre, cette tension peut être dangereuse pour les personnes. *La sécurité des personnes exige qu'elle soit inférieure à une tension limite U_L (50V locaux secs, 25V locaux humides et 12V locaux mouillés). Les dispositifs de protection doivent donc couper l'alimentation dans des temps prescrits, avant que la tension U_c ne soit supérieure à la tension U_L . (Tab.1).*

Tension de contact présumée en (V) ; locaux secs	50	75	90	120	150	220	280	350	500
Temps de coupure max de l'appareil de protection (s)	5	0.6	0.45	0.34	0.27	0.17	0.12	0.08	0.04
Tension de contact présumée en (V) ; locaux humides	25	50	75	90	110	150	220	280	
Temps de coupure max de l'appareil de protection (s)	5	0.48	0.3	0.25	0.18	0.1	0.05	0.02	

Tableau 1 : Tableau de sécurité donnant la durée maximale de maintien de la tension de contact selon CEI 60364

Les défauts à la masse n'ont pas comme conséquences seulement le courant de défaut i_d et la tension de contact U_c , mais aussi ils peuvent entraîner des surtensions au niveau de l'isolement par rapport la terre.

En effet le potentiel du neutre se trouve aussi porté à : $V_N = -Z_n \cdot i_d = -\frac{Z_n \cdot V_1}{z_{ph1} + z_{pe} + Z_u + Z_n}$

Les potentiels des phases par rapport la terre sont : $V_{k0} = V_k + V_N = V_k - \frac{Z_n \cdot V_1}{z_{ph1} + z_{pe} + Z_u + Z_n}$; $k = 1,2,3$

Les risques que peuvent subir les personnes et les équipements lors d'un défaut sont liés aux valeurs des courants et tensions qui se développent dans le circuit en défaut. On cherche toujours à les limiter par des moyens de protection adéquats. Cependant, il y a lieu de trouver un compromis, car les mesures qui réduisent les courants de défaut tendent à favoriser l'apparition de surtensions, et inversement.

3 Schémas de liaison à la terre (SLT)

On ne s'intéresse qu'aux défauts d'isolement à la masse : défauts considérés francs (impédance nulle). Les sections sont supposées telles que les réactances sont négligeables devant les résistances. Si une boucle fait intervenir les prises de terre, les résistances de ces dernières sont dominantes ($R_u, R_n \gg r_{ph}, r_{pe}$)

3.1 Schéma TT

T : Le neutre de la source est mis directement à une prise de terre, de résistance fictive R_n .

T : Les masses sont reliées, à l'aide de conducteurs « PE » de couleur *vert-jaune*, à une prise de terre de résistance fictive R_u . Les prises de terre du neutre et des masses peuvent être interconnectées ou non, les masses éloignées peuvent avoir des prises de terre locales (R_a)

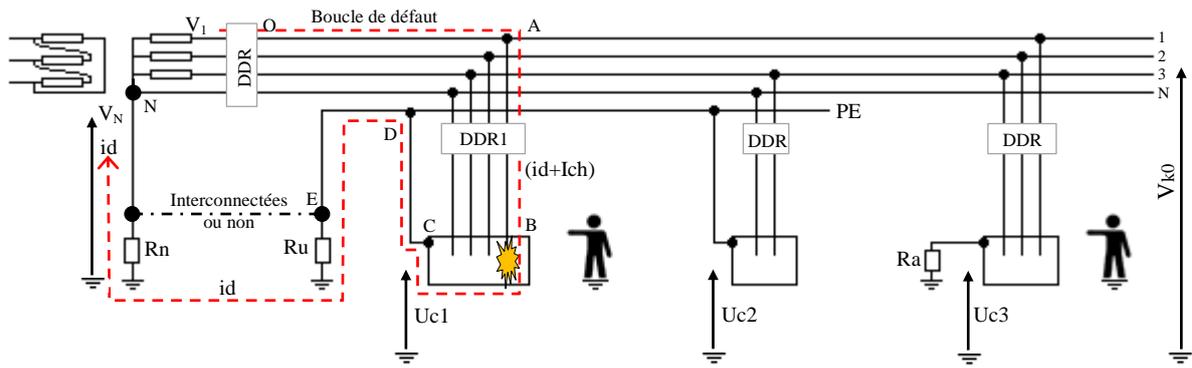


Figure 5 : Schéma TT avec boucle de défaut franc phase1/masse

Le courant de défaut est :
$$i_d = \frac{V_1}{Z_{boucle}} = \frac{V_1}{r_{OAB} + r_{BC} + r_{CDE} + R_u + R_n} = \frac{V_1}{r_{ph} + r_{pe} + R_u + R_n} \approx \frac{V_1}{R_u + R_n}$$

Il se referme et se limite par les résistances des prises de terre, sa valeur risque d'être très faible pour solliciter les dispositifs de protection contre les surintensités.

Les tensions de contact sont : $U_{c1} = (R_u + r_{ED} + r_{DC})i_d$; $U_{c2} = (R_u + r_{ED})i_d$; $U_{c3} = 0$

Si on néglige les impédances des portions des conducteurs devant celles des prises de terre, alors les masses interconnectées par le conducteur « PE » se trouvent porter à la même tension de contact U_c :

$$U_c = U_{c1} = U_{c2} \approx R_u \cdot i_d = \frac{R_u}{R_u + R_n} V_1 \geq \frac{1}{2} V_1 \quad (\text{Car habituellement } R_n \leq R_u)$$

Cette tension présente des risques pour toute personne touchant ces masses. Il y aura danger sur les personnes dès l'instant où la tension de contact U_c dépasse la tension limite U_L . La sécurité des personnes exige alors : $U_c \leq U_L \Leftrightarrow i_d \leq \frac{U_L}{R_u}$

Dès que la valeur d'un courant de défaut i_d dépasse le seuil maximal ($i_{dmax} = \frac{U_L}{R_u}$), la tension de contact développée devient dangereuse pour les personnes. Il faut alors **couper l'alimentation** du circuit en défaut **dans un temps prescrit** (Tab.1 ou Tab.4)

Le courant total, $(I_{ch} + i_d)$, correspond à une légère surcharge qui ne sera pas détectée (ou détectée beaucoup trop lentement) par les dispositifs de protection contre les surintensités. Il faut donc, un appareil capable de détecter et d'éliminer les courants, même si faibles, qui se referment par la terre, d'où l'utilisation **des disjoncteurs différentiels à courants résiduels (DDR)** de sensibilité $I_{\Delta n}$.

On définit la sensibilité d'un DDR par : $I_{\Delta n} \leq \frac{U_L}{R_u}$

Prise de terre : R_u (Ω)	≤ 20	50	100	150	500	≥ 500
i_{dmax}	$\geq 2.5A$	1A	500 mA	333mA	100mA	$\leq 100mA$
$I_{\Delta n}$	3A	1A	500 mA	300mA	100mA	30mA
Type de sensibilité	Basse		Moyenne			Haute

Tableau 2 : Sensibilités nominales des disjoncteurs différentiels en fonction des résistances de terre ($U_L=50V$: locaux secs)

Exemple schéma TT

Dans la figure (5), ($OA=DE=20m$, Cu, $50mm^2$; $AB=CD=50m$, Cu, $25mm^2$) ; $\rho=22.5 \times 10^{-3} \Omega mm^2/m$. $R_n=10\Omega$ et $R_u=15\Omega$. Tension simple 230V, local sec ($U_L=50V$) et défaut supposé franc.

$$r_{OA} = r_{DE} = \rho \frac{l}{s} = \frac{22.5 \times 10^{-3} \times 20}{50} = 0.009 \Omega = 9 m\Omega ; \quad (\text{Négligeable devant } R_n \text{ et } R_u)$$

$$r_{AB} = r_{CD} = \rho \frac{l}{s} = \frac{22.5 \times 10^{-3} \times 50}{25} = 0.045 \Omega = 45 \text{ m}\Omega ; (\text{Négligeable devant } R_n \text{ et } R_u)$$

$$i_d = \frac{V_1}{2(r_{OA} + r_{BC}) + R_u + R_n} = \frac{230}{25.108} = 9.16 \text{ A (Faible ou normal)}$$

$$U_{c1} = (R_u + r_{DE} + r_{CD})i_d = 15.054 \times 9.16 = 137.9 \text{ V (Dangereuse)}$$

$$U_{c2} = (R_u + r_{DE})i_d = (15 + 0.015) \times 9.1615 = 137.5 \text{ V (Dangereuse)}$$

La sensibilité du DDR1 doit être choisie telle que : $I_{\Delta n1} \leq \frac{U_L}{(R_u + r_{DE} + r_{CD})} = \frac{50}{15.054} = 3.32 \text{ A}$; le temps de coupure du DDR1 selon Tab.1 doit être de l'ordre de 0.27s, et 0.2s selon Tab.4.

- Le potentiel du neutre lors du défaut (avant coupure) est : $V_N = -R_n i_d = -91.6 \text{ V}$
- Les surtensions des phases saines (2 et 3) : $\|V_{k0}\| = \sqrt{\|U\|^2 + \|U_c\|^2 + 2 \cdot \|U\| \cdot \|U_c\| \cdot \cos 150^\circ}$
- $\|V_{k0}\| = \sqrt{\|400\|^2 + \|138\|^2 - \sqrt{3} \cdot \|400\| \cdot \|138\|} = 288.85 \text{ V}$ (Disparaît après coupure par DDR)

3.2 Schéma TN

T : Le neutre de la source est mis directement à la terre par une prise de terre R_n

N : Les masses sont reliées au neutre, par les conducteurs PEN ou PE (*de couleur vert-jaune*).

Trois situations sont possibles :

Schéma TNC : un même conducteur dit **PEN** (vert-jaune) commun pour le neutre et les masses.

Schéma TNS : le conducteur neutre **N** et de protection des masses **PE** sont séparés

Schéma TNC-S : on réalise le **TNC** en amont du **TNS**. L'inverse est interdit.

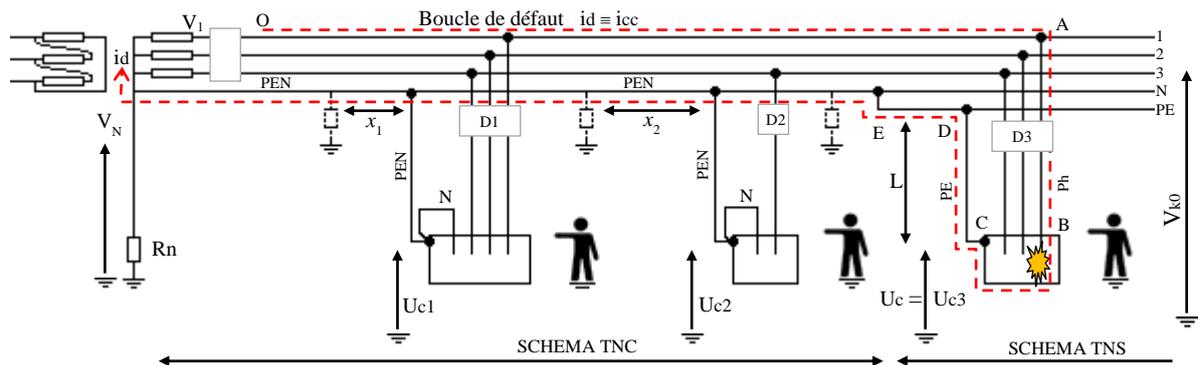


Figure 6 : Schéma TNC-S et boucle de défaut phase/masse.

En TNC, le conducteur PEN, régulièrement mis à la terre, doit impérativement être raccordé sur la borne de masses avant d'être raccordé à la borne neutre du récepteur. Si accidentellement le PEN est coupé, les masses en aval de la coupure se trouvent porter à la tension simple du réseau. Ce risque est d'autant plus probable que lorsque les conducteurs ont des sections faibles et donc mécaniquement fragiles. De ce fait, le régime TNC est interdit pour les sections inférieures à $10\text{mm}^2\text{Cu}$ ou $16\text{mm}^2\text{Al}$.

Le TNS est imposé par les normes si les sections sont inférieures à $10\text{mm}^2\text{Cu}$ ou $16\text{mm}^2\text{Al}$, ou si les longueurs des circuits sont trop importantes. S'il y a association TNC-S, le TNC doit être réalisé en amont du TNS. L'inverse est strictement interdit.

En régime TN, la boucle de défaut est indépendante de la terre et est formée par des conducteurs de *très faibles résistances*. Les courants sont habituellement exprimés par les grandeurs du circuit en défaut en supposant à son origine une tension V_{AD} d'environ 80% de V_1 .

$$i_d = \frac{V_1}{R_{boucle}} \approx \frac{V_{AD}}{r_{AD}} = \frac{V_{AD}}{r_{AB} + r_{BC} + r_{CD}} \approx \frac{0.8 \cdot V_1}{r_{ph} + r_{pe}} = i_{cc} ;$$

Pour des défauts francs ($r_{BC} \approx 0$), ces courants s'apparentent aux courants de court-circuit monophasé dangereux pour le matériel. Ainsi, le régime TN transforme un défaut à la masse en un défaut de court-circuit monophasé dont la protection se fait *par coupure d'alimentation* à l'aide des appareils de protection contre les surintensités : **fusibles et disjoncteurs magnétothermiques**.

Les tensions de contact développées dans les masses dépendent des mises à la terre du conducteur PEN. S'il est mis à la terre régulièrement le long de sa longueur, il forme alors *un bon équipotentiel*.

La tension de contact de la masse en défaut, sera : $U_c = U_{c3} = (r_{CD} + r_{DE}) \cdot i_d \approx r_{pe} \cdot i_d$

$$U_c = \frac{r_{pe}}{r_{ph} + r_{pe}} \cdot 0.8 \cdot V_1 = \frac{m}{1+m} \cdot 0.8 \cdot V_1 ; \quad \text{Où } m = \frac{r_{pe}}{r_{ph}}$$

C'est une tension pouvant être dangereuse pour les personnes ($m \approx 1$; $U_c \approx 0.4 \cdot V_1$). Les tensions de contact des masses saines seront inoffensives, car les résistances des portions x_i du conducteur PEN sont négligeables devant celles de la boucle de défaut ($r_{xi} \ll r_{ph} + r_{pe}$).

$$U_{ci} = r_{xi} i_d = \frac{r_{xi}}{r_{ph} + r_{pe}} \cdot 0.8 \cdot V_1 \approx 0; \quad i = 1,2$$

Si le conducteur PEN est mis à la terre une ou peu de fois, les portions x_i deviennent importantes, leurs résistances deviennent considérables (équipotentialité compromise) et les masses saines se trouvent à des tensions assez proches que celle de la masse en défaut. Le temps maximal de *coupure d'alimentation*, (Tab.1), doit être très court. Donc seuls des déclencheurs électroniques, magnétiques et des fusibles pourront intervenir à temps (les déclencheurs thermiques agissent trop tard).

Dans ce régime, les défauts à la masse n'engendrent pas de surtensions dans les phases saines, car le potentiel du point neutre reste égal à celle de la terre (pas de courant dans la terre du neutre : Rn).

Dans tous les cas, pour que la protection soit assurée, l'appareil de protection doit avoir un courant de déclenchement inférieur au courant de défaut $I_a \leq i_d$. Dans la pratique et pour circuits loin des sources, il n'est pas nécessaire de connaître le courant de défaut. Il suffit d'évaluer la *longueur maximale protégée* en fonction du courant de déclenchement de l'appareil de protection.

$$I_a \leq i_d = \frac{0.8 \cdot V_1}{r_{ph} + r_{pe}} = \frac{0.8 \cdot V_1}{r_{ph}(1+m)} = \frac{0.8 \cdot V_1 \cdot s_{ph}}{\rho L \cdot (1+m)} \Leftrightarrow L \leq \frac{0.8 \cdot V_1 \cdot s_{ph}}{\rho \cdot (1+m) \cdot I_a} \Leftrightarrow L_{max} = \frac{0.8 \cdot V_1 \cdot s_{ph}}{\rho \cdot (1+m) \cdot I_a}$$

- L_{max} : longueur maximale protégée en (m) ; V_1 : tensions simple en (V)
- $m = \frac{r_{pe}}{r_{ph}} = \frac{s_{ph}}{s_{pe}}$; s_{ph} et s_{pe} : sont les sections en (mm²) des conducteurs 'phase' et 'PE'.
- ρ : résistivité des conducteurs en ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)

La protection devrait assurer la coupure d'alimentation en des temps correspondant à la tension de contact présumée (Tab.1). Cependant la norme CEI 364 et NF C 15-100 admettent de ne pas tenir compte de la tension de contact présumée et fixe des temps de coupure dépendant de la tension nominale du réseau (Tab.4).

Exemple schéma TN

Dans la figure (6). (OA= L_{PEN} = 30m, Cu, 50mm² ; AB=CDE =50m, Cu, 25mm²). $\rho=22.5 \times 10^{-3} \Omega\text{mm}^2/\text{m}$. Rn=10 Ω . Tension simple 230V, local sec ($U_L=50V$) et défaut supposé franc.

Calculs exacts :

$$r_{OA} = r_{PEN} = \rho \frac{l}{s} = \frac{22.5 \times 10^{-3} \times 30}{50} = 0.0135 \Omega = 13.5 \text{ m}\Omega$$

$$r_{AB} = r_{CDE} = \rho \frac{l}{s} = \frac{22.5 \times 10^{-3} \times 50}{25} = 0.045 \Omega = 45 \text{ m}\Omega$$

$$r_{boucle} = 2(r_{OA} + r_{AB}) = 0.117 \Omega = 117 \text{ m}\Omega$$

$$i_d = \frac{V_1}{r_{boucle}} = \frac{230}{0.117} = 1965.81 \text{ A} = 1.96 \text{ kA}$$

$$U_c = U_{c3} = r_{CDE} \cdot i_d = 88.46 \text{ V} \text{ (Temps max de coupure est de l'ordre } 0.45 \text{ s selon Tab.1 ou } 0.4 \text{ s selon Tab.4)}$$

Si le conducteur PEN est mis à la terre régulièrement, d'une façon par exemple que les portions x_i soient : ($x_1 = 4 \text{ m}$, $x_2 = 11 \text{ m}$) \Rightarrow ($r_{x1} = \rho \frac{x_1}{s_{pen}} = 0.0018 \Omega$; $r_{x2} = \rho \frac{x_2}{s_{pen}} = 0.00495 \Omega$;) $\Rightarrow U_{c1} = r_{x1} \cdot i_d = 3.54 \text{ V}$; $U_{c2} = r_{x2} \cdot i_d = 9.73 \text{ V}$ (tensions inoffensives).

Calculs approchés : $i_d \approx \frac{V_{AD}}{r_{AD}} = \frac{0.8V_1}{r_{AB} + r_{CDE}} = \frac{0.8V_1}{2r_{AB}} = 2044.44 \text{ A} = 2.04 \text{ kA}$; $U_c = U_{c3} = r_{CDE} \cdot i_d = 92 \text{ V}$

3.3 Schéma IT

I : le neutre de la source est isolé de la terre ou relié à la terre par une impédance élevée (Z).

T : les masses des récepteurs sont interconnectées par le conducteur PE et reliées à la prise de terre d'utilisation (des masses) de résistance fictive R_u

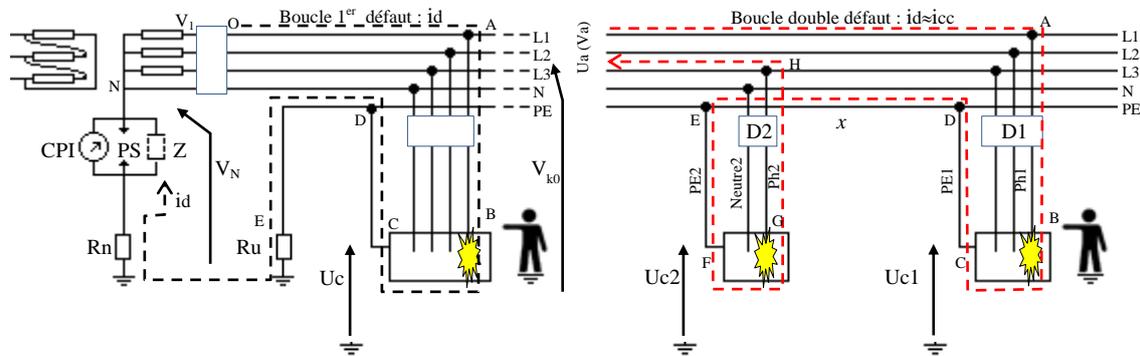


Figure 7 : Schéma IT, et boucles de défaut simple et de défaut double.

- Un contrôleur permanent d'isolement « CPI » et un parasurtenseur « PS » sont installés entre le neutre et la terre. Le CPI est pour avertir de la présence d'un défaut d'isolement, le PS est pour protéger contre les surtensions du neutre en cas de défaut. (à 50 Hz leurs impédances sont infinies)
- L'impédance additionnelle Z n'est pas forcément présente, peut représenter les capacités de fuites entre les phases et la terre ou de valeur élevée de l'ordre $\geq 5 \text{ k}\Omega$

3.3.1 Défaits simples

Lors d'un défaut simple (1^{er} défaut seul), le courant de défaut et la tension de contact sont très faibles car l'impédance Z , très élevée, est dominante ($Z \gg r_{ph} + r_{pe} + R_n + R_u$).

$$i_d = \frac{V_1}{Z_{boucle}} = \frac{V_1}{r_{OAB} + r_{CDE} + R_n + R_u + Z} = \frac{V_1}{r_{ph} + r_{pe} + R_n + R_u + Z} \approx \frac{V_1}{Z} \approx 0 \quad \text{(Faible)}$$

$$U_c = (r_{CDE} + R_u) \cdot i_d = (r_{pe} + R_u) \cdot i_d \approx 0 \quad \text{(Faible)}$$

Par conséquent il n'y a aucun risque ni pour les personnes ni pour le matériel, *donc aucune coupure d'alimentation n'est nécessaire et la continuité de service est assurée*. Cependant il faut s'assurer que l'isolement du matériel supporte bien les surtensions développées au niveau des phases saines. En effet, lors de défaut, le potentiel du neutre augmente à : $V_N = -(Z + R_n) \cdot i_d = -\frac{(Z + R_n)V_1}{Z} \approx -V_1$

Les potentiels des autres phases saines ($k=2, 3$) deviennent : $V_{k0} = V_k + V_N \approx (V_k - V_1) \approx U_{k1}$. Elles se trouvent porter par rapport la terre à des surtensions de l'ordre de la tension composée.

Donc, le schéma IT, favorise la continuité d'alimentation lors d'un seul défaut à la masse. Le rôle du CPI est d'avertir de la présence d'un 1^{er} défaut d'isolement afin de procéder à sa recherche et son élimination avant qu'un 2^{ème} défaut se produira, dont les conséquences seront dangereuses. Le rôle du PS est de créer un point faible permettant l'amorçage des surtensions dangereuses vers la terre.

3.3.2 Défaut double

Deux défauts d'isolement simultanés, entre deux conducteurs différents et la masse, dans un même récepteur ou dans deux récepteurs différents. Le courant de défaut circule dans une boucle, indépendante de la terre, formée par des conducteurs de très faibles impédances.

$$i_d = \frac{U_{AH}}{r_{AH}} = \frac{U_a}{r_{AB}+r_{CD}+r_{DE}+r_{EF}+r_{GH}} = \frac{0.8 U}{r_{ph1}+r_{pe1}+r_x+r_{pe2}+r_{ph2}}; \text{ (court-circuit biphasé)}$$

Ces courants s'apparentent à des courants de court-circuit (mono ou biphasés), de conséquences dangereuses pour le matériel et les personnes. Il faut donc *couper l'alimentation* des deux récepteurs rapidement, en appliquant les mêmes règles de protection qu'en schémas TN.

Les tensions de contact développées aux niveaux des masses sont :

$$U_{c1} = (r_x + r_{pe1}) \cdot i_d = \frac{r_x+r_{pe1} \cdot 0.8 U}{r_{ph1}+r_{pe1}+r_x+r_{pe2}+r_{ph2}}; \quad U_{c2} = -r_{pe2} \cdot i_d = -\frac{r_{pe2} \cdot 0.8 U}{r_{ph1}+r_{pe1}+r_x+r_{pe2}+r_{ph2}}$$

Ce sont des tensions qui peuvent être dangereuses pour les personnes, la coupure d'alimentation doit être dans des temps prescrits. Tab.1 ou Tab.4.

Si les deux circuits en défaut sont proches ($r_x \approx 0$) et de mêmes longueurs ($r_{ph} = r_{ph1} = r_{ph2}$) et ($r_{pe} = r_{pe1} = r_{pe2}$), alors $i_d = \frac{0.8 U}{2(r_{ph}+r_{pe})} = \frac{0.8 U}{2r_{ph}(1+m)} = \frac{0.8 U \cdot s_{ph}}{2\rho L(1+m)}$, où $m = \frac{r_{pe}}{r_{ph}} = \frac{s_{ph}}{s_{pe}}$

En appliquant les mêmes règles de protection qu'en schémas TN, le dispositif de protection contre les surintensités doit avoir un courant de déclenchement $I_a \leq i_d \Leftrightarrow I_a \leq \frac{0.8 U \cdot s_{ph}}{2\rho L \cdot (1+m)} \Leftrightarrow L \leq \frac{0.8 U_s \cdot s_{ph}}{2\rho \cdot (1+m) \cdot I_a}$.

$$\Leftrightarrow L_{max} = \frac{0.8 U_s \cdot s_{ph}}{2\rho \cdot (1+m) \cdot I_a} \text{ (Longueur maximale protégée si neutre non distribué)}$$

$$L_{max} = \frac{0.8 V_1 \cdot s_N}{2\rho \cdot (1+m) \cdot I_a}; \quad m = \frac{r_{pe}}{r_N} = \frac{s_N}{s_{pe}} \text{ (Longueur maximale protégée si neutre distribué)}$$

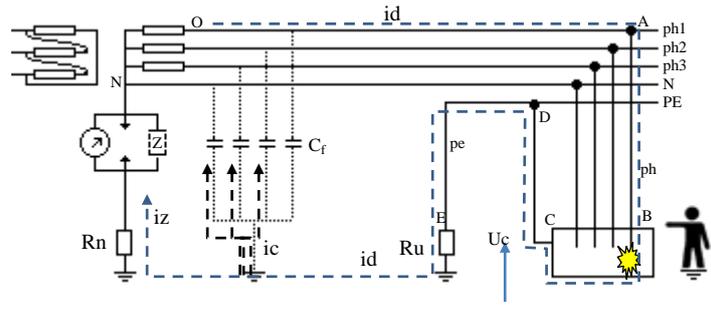
La norme NFC admet de ne pas considérer la tension de contact présumée, et ne considère que des temps de coupure fixes, dépendant des tensions nominales des circuits (Tab.4).

	50V<Un≤120V		120V<Un≤230V		230V<Un≤400V		Un > 400V	
Temps de coupure (s)	Alternatif	continu	Alternatif	continu	Alternatif	continu	Alternatif	continu
Schéma TT	0.3	5	0.2	0.4	0.07	0.2	0.04	0.1
Schéma TN ou IT	0.8	5	0.4	5	0.2	0.4	0.1	0.1

Tableau 3 : Temps de coupure maximal en fonction de la tension nominale et du SLT. (NFC 15-100)

Exemple schéma IT (premier défaut)

OA=20m, Cu, 50mm² ; AB=CD=DE=50m, Cu, 25mm² ; c_f=0.25nF/m ; Ru=15Ω ; Rn=10Ω ; Z=5kΩ ; V=230V.



$$r_{OA} + r_{AB} = r_{ph} = 22.5 \left(\frac{20}{50} + \frac{50}{25} \right) = 54m\Omega = 0.054\Omega \ll (Z, R_n, R_u, z_{cf})$$

$$r_{CD} + r_{DE} = r_{pe} = 22.5 \left(\frac{50}{25} + \frac{50}{25} \right) = 90m\Omega = 0.09\Omega$$

$$C_f = (OA + AB) \cdot c_f = (20 + 50) \cdot 0.25 = 17.5nF = 1.75 \times 10^{-8}F \Rightarrow z_{cf} = \frac{1}{j\omega C_f} = \frac{10^8}{j314 \times 7} = -j181.9 k\Omega$$

$$i_d = i_c + i_z = \frac{(V_1 - V_2) + (V_1 - V_3) + (V_1 - V_N)}{r_{ph} + r_{pe} + r_u + z_{cf}} + \frac{V_1 - V_N}{r_{ph} + r_{pe} + r_u + r_n + Z}; \text{ Avec : } z_{cf} \gg (r_{ph} + r_{pe} + r_u); Z \gg (r_{ph} + r_{pe} + r_u + r_n)$$

$$i_d \approx \frac{4V_1}{z_{cf}} + \frac{V_1}{Z} = \frac{4 \times 230}{-j181.9 \times 10^3} + \frac{230}{5000} = (j0.005 + 0.046) \approx 0.046 \angle 6.2^\circ A \text{ (Très faible, aucun danger sur le matériel)}$$

$$U_c = (R_u + r_{pe}) i_d = 15.09 \times 0.046 \approx 0.7 V \text{ (Inoffensive, aucun danger sur les personnes)}$$

$$V_N \approx -Z \cdot i_z = 5000 \times 0.046 = -230V = -V_1$$

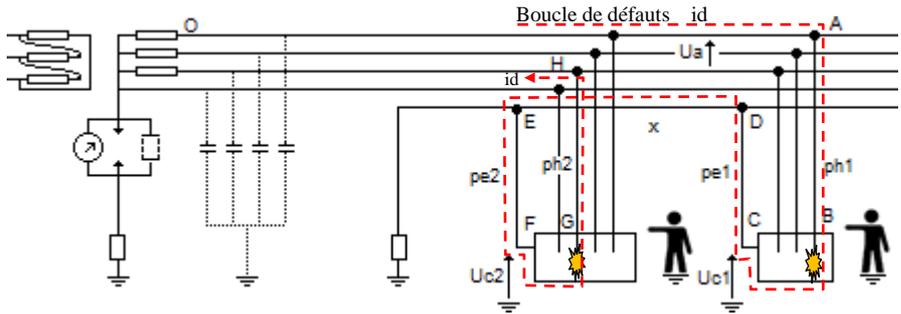
$$|V_{10}| = |V_1 + V_N| = |V_1 - V_1| = 0 \text{ (potentiel par rapport la terre de la phase en défaut)}$$

$$|V_{20}| = |V_2 + V_N| = |V_2 - V_1| = |U_{21}| \equiv 400V \text{ (potentiel par rapport la terre de la phase 2, surtension)}$$

$$|V_{30}| = |V_3 + V_N| = |V_3 - V_1| = |U_{31}| \equiv 400V \text{ (potentiel par rapport la terre de la phase 3, surtension)}$$

Exemple schéma IT (double défaut)

AB=CD=50m, Cu, 50mm²; EF=GH=30m, Cu, 25mm² x=5m, Cu, 50mm² ; Ua=U_{AH}=0.8x400V.



$$Z_{boucle} \approx r_{AH} = r_{AB} + r_{CD} + r_{DE} + r_{EF} + r_{GH} = r_{ph1} + r_{pe1} + r_x + r_{pe2} + r_{ph2} = 0.10125\Omega \text{ (faible)}$$

$$i_d \approx \frac{U_{AH}}{r_{AH}} = \frac{U_a}{r_{AH}} = \frac{0.8 \times 400}{0.10125} = 3160.5 A = 3.16 kA \text{ (court-circuit biphasé = surintensité dangereuse)}$$

$$U_{c1} = (r_x + r_{pe1}) i_d = 0.02475 \times 3160.5 = 78.22 V \text{ (dangereuse pour les personnes)}$$

$$U_{c2} = -r_{pe2} \cdot i_d = -0.027 \times 3160.5 = -85.33 V \text{ (dangereuse pour les personnes)}$$

La tension entre les deux masses en défaut est $U_{c12} = U_{c1} - U_{c2} = 163.55 V$ (dangereuse pour les personnes)

	TT	TN	IT
Principes	Détection d'un courant de défaut passant par la terre et coupure de l'alimentation par dispositif à courant différentiel DDR	Le courant de défaut est transformé en courant de court-circuit. Coupure de l'alimentation par les dispositifs de protection contre les surintensités : fusibles et disjoncteurs magnétothermiques	La maîtrise du courant de 1er défaut à une valeur très faible limite la montée en potentiel des masses, il n'y a alors pas nécessité de coupure
Avantages	Simple, extension sans calcul des longueurs, courants de défaut faibles, peu de maintenance, sécurité en cas d'alimentation des appareils portatifs ...	Coût réduit (les mêmes protections utilisées pour défauts et surintensités). La prise de terre n'a pas d'influence sur la sécurité des personnes. Peu sensible aux courants de fuite élevés	Continuité de service (pas de coupure au 1er défaut). Alimentation de récepteurs sensibles aux courants de défaut (moteurs)
Inconvénients	Nécessité des DDR sur chaque départ pour obtenir une sélectivité Interconnexions des masses à une seule prise de terre ou DDR nécessaire par groupe de masses Niveau de sécurité dépendant de la valeur des prises de terre	Courants de défauts élevés (génération de perturbations et risques d'incendie Nécessite des calculs de lignes précis Risques en cas d'extensions de rénovation ou d'utilisations non maîtrisées. (Nécessite un personnel compétent)	Coûts d'installation et d'exploitation (neutre protégé, CPI, PS, personnel compétent, localisation des défauts) Risques au 2e défaut : surintensités de court-circuit, perturbations ... Risque en cas d'extensions-rénovation (Nécessite un personnel compétent)
Utilisation conseillée	Réseau de distribution publique BT. Réseau étendu avec prises de terre médiocres. Alimentation par transformateur à faible Ik (courant de court-circuit). Groupe électrogène temporaire Réseau en lignes aériennes Nombreux appareils mobiles ou portatifs Installations avec modifications fréquentes : Installations de chantier, Installations anciennes Locaux à risques d'incendie ...	Réseau perturbé (zone foudroyée) et Réseau à courants de fuite importants. En TNS , groupe électrogène temporaire, Equipements électroniques informatiques Equipement avec auxiliaires (machines-outils) Equipement de manutention (palans, ponts, grues...) Appareils avec isolement faible (appareils de cuisson, à vapeur...) Installations à courant de fuite important (marinas...)	Groupe électrogène (alimentation de sécurité), Source de sécurité des circuits de sécurité des ERP Locaux à risque d'incendie Installations de contrôle de commande avec nombreux capteurs Installations avec exigence de continuité (médical, pompes, ventilation...) Appareils sensibles aux courants de fuite (risque de destruction de bobinages) ...

Tableau 4 : Tableau montrant quelques comparaisons entre les trois SLT.

4 Conclusion

Les stratégies de protection dans un réseau sont conditionnées en grande partie par le choix de la relation entre ce réseau et la terre (les schémas de mise à la terre). Il est en effet possible, pour établir une stratégie de protection, de :

- Laisser en permanence les deux groupes, *Réseau et Terre*, indépendants, et détecter par différents systèmes le premier défaut entre eux. Si l'on détecte ce 1^{er} défaut et si l'on peut le supprimer avant qu'un 2^{ième} s'établisse, la sécurité du système sera assurée. Le réseau est alors dit à « *réseau à neutre isolé* ».
- Connecter volontairement et directement les deux groupes de façon fixe (comme si nous créons volontairement le 1^{er} défaut). On pourra ensuite détecter l'apparition d'un défaut, qui se traduira par la circulation d'un courant anormal, et prendre les mesures qui s'imposent pour rompre l'alimentation à la source (par disjoncteurs ou fusibles). Le réseau est alors dit à « *réseau à neutre mise à la terre* ».
- Connecter indirectement les deux groupes par une impédance Z_n qui permet de contrôler les effets d'un défaut d'isolement. Cette solution est intermédiaire aux deux précédentes et n'est pas présentée dans ce cours. Le réseau est dit à « *réseau à neutre impédant* » qui ressemble en grand partie à ce à neutre isolé.