
2. Les régimes de neutre

2. LES REGIMES DE NEUTRE

2.1. Introduction

Dans tout système triphasé haute ou basse tension existent trois tensions simples, mesurées entre chacune des phases et un point commun appelé "point neutre". En régime équilibré ces trois tensions sont déphasées de 120 ° et ont pour valeur :

$$U / \sqrt{3}$$

U étant la tension composée mesurée entre phases (voir fig. 2-1).

Physiquement, le neutre est le point commun de trois enroulements montés en étoile. Il peut être sorti ou non, distribué ou non. En moyenne tension, la distribution du neutre est exceptionnelle en France (1) ; par contre, elle est très fréquente aux U.S.A. En basse tension, la distribution du neutre est utilisée dans tous les pays.

Dans une installation haute ou basse tension, le neutre peut ou non être relié à la terre. On parle alors de **régime du neutre**.

La connexion du neutre à la terre peut être réalisée directement, ou par l'intermédiaire d'une résistance ou d'une réactance. Dans le premier cas, on dit que l'on a un neutre direct à la terre et dans le second cas, que le neutre est impédant.

Lorsqu'il n'existe aucune liaison intentionnelle entre le point neutre et la terre, on dit que le neutre est isolé.

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

Un neutre direct à la terre contribue à limiter les surtensions; par contre, il engendre des courants de défaut très importants. Au contraire, un neutre isolé limite les courants de défaut à des valeurs très faibles, mais favorise l'apparition de surtensions élevées.

Dans toute installation, la continuité de service en présence d'un défaut d'isolement est également liée au régime du neutre. Un neutre isolé permet la continuité de service en basse tension et même en haute tension, sous réserve de respecter le décret sur la protection des travailleurs. Un neutre direct à la terre, ou faiblement impédant, impose au contraire un déclenchement dès l'apparition du premier défaut d'isolement.

L'importance des dommages que subissent certains équipements tels que les moteurs et les alternateurs présentant un défaut d'isolement interne, est également lié au régime du neutre.

(1) En France, la distribution du neutre n'est utilisée en moyenne tension que pour les installations d'éclairage public norme NFC 17-200.

Dans un réseau à neutre direct à la terre, une machine affectée d'un défaut d'isolement est fortement endommagée en raison de la valeur élevée des courants de défaut.

Dans un réseau à neutre isolé ou fortement impédant, les dommages sont au contraire réduits, mais il est nécessaire que les équipements aient un niveau d'isolement compatible avec le niveau des surtensions pouvant se développer dans ce type de réseau.

Le régime du neutre a également une influence importante sur la nature et le niveau des perturbations électromagnétiques générées dans une installation électrique.

Les schémas favorisant des courants de défaut élevés et leur circulation dans les structures métalliques des bâtiments sont très perturbateurs.

Au contraire, les schémas qui tendent à réduire ces courants et qui garantissent une bonne équipotentialité des masses sont peu perturbateurs.

Le choix du régime du neutre, tant en basse tension qu'en haute tension, dépend à la fois de la nature de l'installation et de celle du réseau. Il est également influencé par la nature des récepteurs, la recherche de la continuité de service et la limitation du niveau de perturbation imposé aux équipements sensibles.

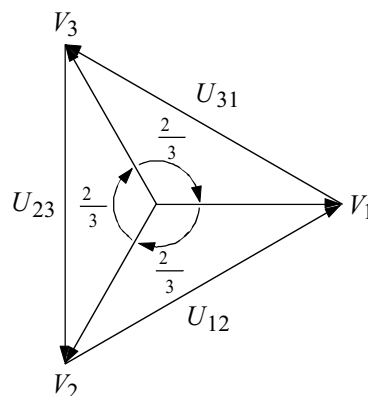
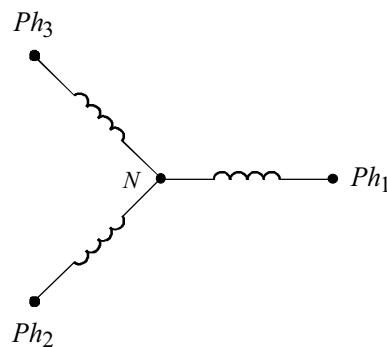


Figure 2-1 : schéma triphasé

V_i : tension phase-neutre

U_{iJ} : tension entre phase

2.2. Les différents régimes de neutre

Les différents modes de raccordement du point neutre à la terre sont indiqués sur le tableau 2-1.

On distingue :

- le neutre directement mis à la terre
- le neutre isolé, ou fortement impédant
- le neutre mis à la terre par l'intermédiaire d'une résistance
- le neutre mis à la terre par l'intermédiaire d'une réactance
- le neutre mis à la terre par l'intermédiaire d'une réactance accordée (bobine de Petersen).

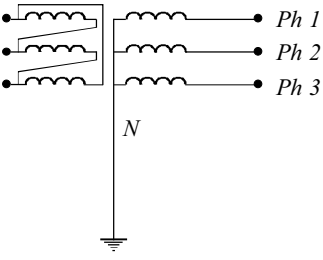
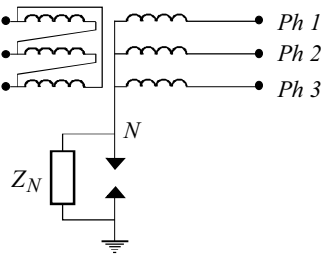
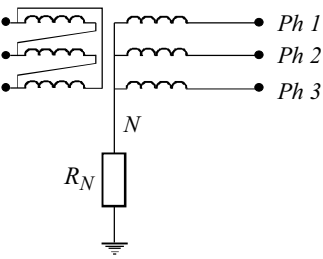
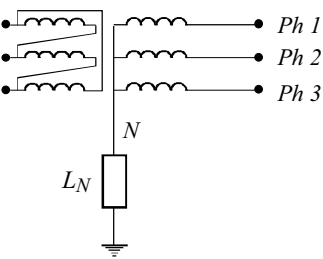
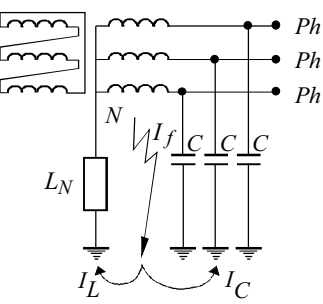
<p>Neutre mis directement à la terre</p> <p>Une liaison électrique est réalisée intentionnellement entre le point neutre et la terre.</p>	
<p>Neutre isolé</p> <p>Il n'existe aucune liaison électrique entre le point neutre et la terre, à l'exception des appareils de mesure ou de protection.</p> <p>Neutre fortement impédant</p> <p>Une impédance de valeur élevée est intercalée entre le point neutre et la terre.</p>	
<p>Neutre mis à la terre par résistance</p> <p>Une résistance est intercalée volontairement entre le point neutre et la terre</p>	
<p>Neutre mis à la terre par réactance</p> <p>Une réactance est intercalée volontairement entre le point neutre et la terre</p>	
<p>Neutre mis à la terre par bobine d'extinction de Petersen</p> <p>Une réactance accordée sur les capacités du réseau est volontairement intercalée entre le point neutre et la terre de sorte qu'en présence d'un défaut à la terre, le courant dans le défaut est nul.</p>	 <p> $\vec{I}_f = \vec{I}_L + \vec{I}_C = \vec{0}$ I_f : courant de défaut I_L : courant dans la réactance de mise à la terre du neutre I_C : courant dans les capacités phase-terre </p>

Tableau 2-1 : modes de raccordement du point neutre

2.3. Influence du régime du neutre

2.3.1. Schéma équivalent d'un réseau (voir fig. 2-3)

■ résistances d'isolement et capacités par rapport à la terre

En basse tension, comme en haute tension, un réseau présente toujours une résistance de fuite entre chacune de ses phases et la terre. En basse tension, pour une tension inférieure à 500 volts, on admet qu'un réseau est correctement isolé quand les résistances de fuite des phases par rapport à la terre (R_1, R_2, R_3) sont au moins égales à 500k Ω (norme C15-100 - § 6.12.3 - tableau 61A).

Sur un réseau correctement isolé, on admet toujours que :

$$R_1 = R_2 = R_3 = R$$

En plus des résistances de fuite, il convient de tenir compte de la capacité que présente chaque phase par rapport à la terre. Soient C_1, C_2, C_3 , ces capacités ; on admet toujours $C_1 = C_2 = C_3 = C$. La valeur de C est proportionnelle à la longueur des câbles constituant le réseau.

En basse tension, C est de l'ordre de 0,25 μF par kilomètre de câble.

Lorsque le réseau alimente des récepteurs équipés de filtres d'entrée branchés entre phase et terre, il y a lieu de prendre en compte la capacité de ces filtres qui contribuent largement à la génération des courants capacitifs, c'est notamment le cas des équipements informatiques.

En haute tension, la valeur de ces capacités dépend de la nature des câbles employés et de celle des isolants entrant dans leur composition.

Dans les câbles à champ radial, chaque conducteur est entouré d'un écran (voir fig. 2-2-a). Les capacités à prendre en compte sont celles mesurées entre chaque conducteur et son écran mis à la terre.

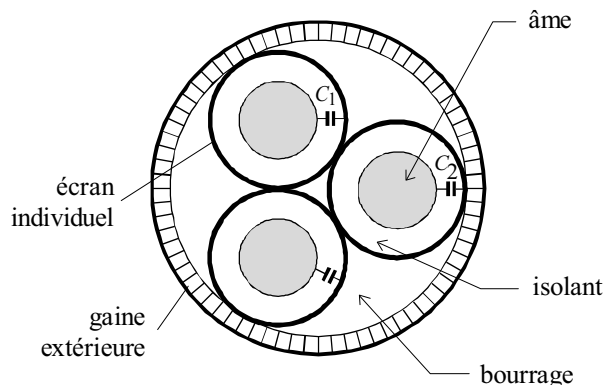


Figure 2-2-a : câble à champ radial

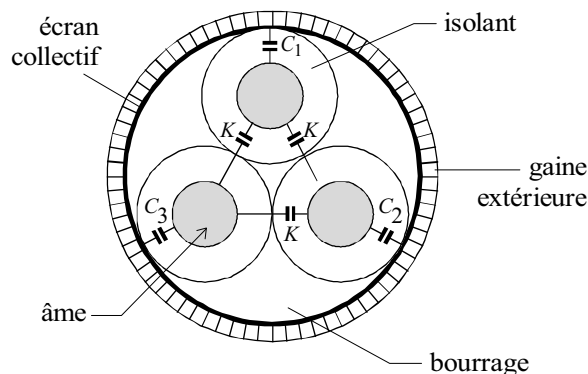


Figure 2-2-b : câble tripolaire à ceinture

Pour les câbles à ceinture, un écran unique entoure les trois conducteurs (voir fig. 2-2-b) ; il existe une capacité K entre les conducteurs pris deux à deux et une capacité C entre chaque conducteur et l'écran mis à la terre. Ce sont les capacités C , mesurées entre chaque conducteur et l'écran, qu'il y a lieu de prendre en considération. Pour ce type de câble, les constructeurs disposent généralement de la capacité C_0 mesurée entre l'écran et les trois âmes conductrices réunies entre elles. La valeur de la capacité existant entre chaque conducteur et l'écran est égale à $\frac{C_0}{3}$.

A titre indicatif, on pourra retenir les valeurs suivantes des capacités phase-terre des câbles.

■ câble à champ radial HT isolé à l'EPR

□ tension 5,5 kV

câble 35 mm ²	0,29 µF/km
câble 70 mm ²	0,35 µF/km
câble 120 mm ²	0,44 µF/km
câble 240 mm ²	0,58 µF/km

□ tension 10 kV

câble 35 mm ²	0,21 µF/km
câble 70 mm ²	0,26 µF/km
câble 120 mm ²	0,31 µF/km
câble 240 mm ²	0,41 µF/km

□ tension 20 kV

câble 70 mm ²	0,17 µF/km
câble 120 mm ²	0,20 µF/km
câble 240 mm ²	0,26 µF/km

■ câble à champ radial HT isolé au PE

□ tension 5,5 kV

câble 35 mm ²	0,27 µF/km
câble 70 mm ²	0,34 µF/km
câble 120 mm ²	0,42 µF/km
câble 240 mm ²	0,54 µF/km

□ tension 10 kV

câble 35 mm ²	0,17 µF/km
câble 70 mm ²	0,21 µF/km
câble 120 mm ²	0,26 µF/km
câble 240 mm ²	0,34 µF/km

□ tension 20 kV

câble 70 mm ²	0,14 µF/km
câble 120 mm ²	0,17 µF/km
câble 240 mm ²	0,21 µF/km

■ câbles à ceinture HT isolés au PVC

□ tension 3,2 kV

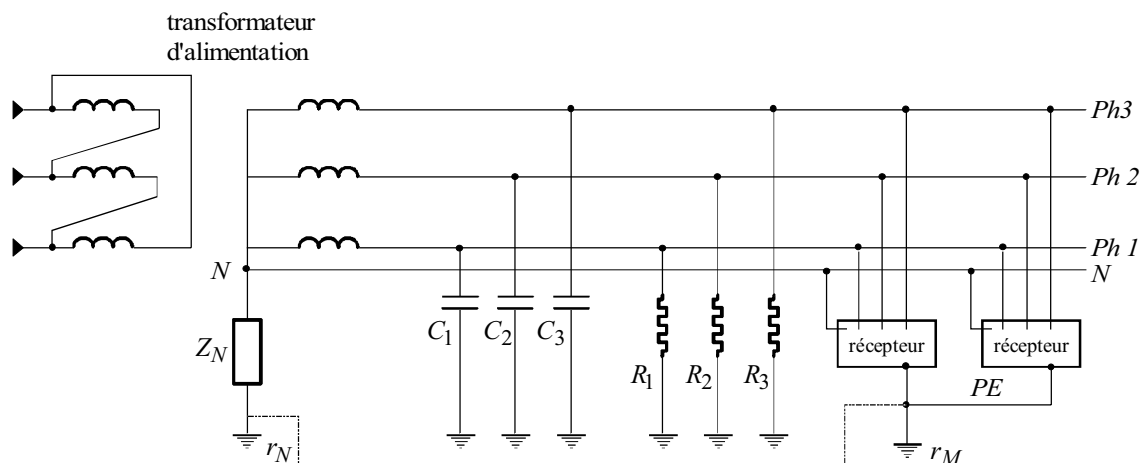
câble 10 mm ²	0,16 µF/km
câble 25 mm ²	0,18 µF/km
câble 35 mm ²	0,17 µF/km

□ tension 6 kV

câble 16 mm ²	0,14 µF/km
câble 50 mm ²	0,21 µF/km
câble 95 mm ²	0,30 µF/km

■ câbles basse tension isolés au PVC

câble 16 mm ²	0,2 µF/km
câble 35 mm ²	0,16 µF/km



- PE : conducteur de protection
 C_1, C_2, C_3 : capacités des conducteurs de phase par rapport à la terre
 R_1, R_2, R_3 : résistances d'isolement, leur influence est toujours négligeable
 Z_N : impédance de mise à la terre du neutre
 r_N : résistance de la prise de terre du neutre
 r_M : résistance de la prise de terre des masses
 N : neutre

Figure 2-3 : schéma équivalent d'un réseau

■ prise de terre et résistance de terre

Lorsque le neutre d'un réseau est mis à la terre, que ce soit directement ou par l'intermédiaire d'une impédance, il est relié à une prise de terre, appelée prise de terre du neutre, présentant une résistance r_N non nulle.

Dans toute installation électrique, basse ou haute tension, les masses métalliques des récepteurs sont généralement interconnectées. L'interconnexion peut être totale ou réalisée par groupes de récepteurs. Chaque groupe interconnecté est relié à une prise de terre de valeur r_M . Il est également possible qu'une ou plusieurs masses soient reliées individuellement à la terre. Les prises de terre des masses et du neutre peuvent ou non être interconnectées et sont parfois communes. Le conducteur d'interconnexion des masses est appelé conducteur de protection et est noté PE ou PEN .

Un réseau basse ou haute tension est donc toujours caractérisé par :

- une résistance d'isolement R
- une capacité C entre chaque phase et la terre
- une prise de terre du neutre de valeur r_N
- une ou plusieurs prises de terre des masses de valeur r_M .

2.3.2. Influence du régime du neutre

2.3.2.1. Régime du neutre et courant de défaut

Considérons un réseau triphasé basse ou haute tension (voir fig. 2-4). Le neutre peut être ou non mis à la terre. Le régime du neutre dépend de la valeur et de la nature de l'impédance Z_N .

Si Z_N est nulle, le neutre est directement mis à la terre.

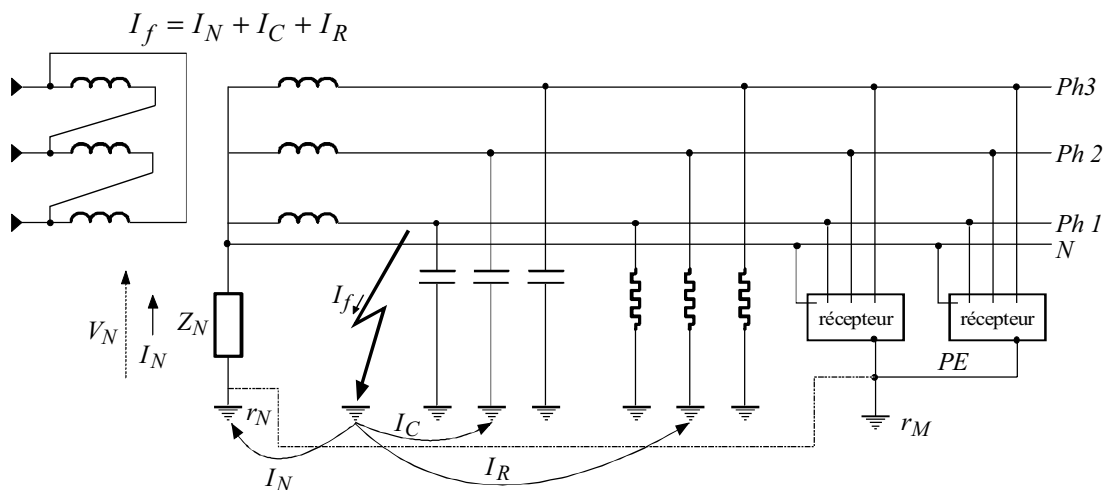
Si Z_N est de valeur très élevée, le neutre est isolé ou fortement impédant.

Si Z_N est différent de zéro, mais de faible valeur (de quelques dizaines à quelques centaines d'ohms en haute tension, suivant le niveau de tension et la nature du réseau), le réseau est dit à neutre impédant. L'impédance Z_N peut être une résistance ou une réactance.

En l'absence de défaut, des courants circulent dans les résistances et les capacités de fuite du réseau. Ces courants étant équilibrés, aucun ne circule dans l'impédance Z_N et le point neutre est au potentiel de la terre :

$$V_N = -Z_N I_N = 0$$

Lorsqu'une phase est mise en contact avec la terre, un courant I_f s'établit entre la phase en défaut et la terre, et se referme par l'impédance Z_N ainsi que par les capacités et résistances de fuite des phases saines :



I_f : courant de défaut

I_N : courant se refermant par l'impédance de mise à la terre du neutre

I_C : courant se refermant par les capacités phase-terre du réseau

I_R : courant se refermant par les résistances d'isolement du réseau, ce courant est toujours négligeable

V_N : montée en potentiel du point neutre

Z_N : impédance de mise à la terre du neutre

Figure 2-4 : montée en potentiel du point neutre

Le point neutre est alors porté à un potentiel:

$$V_N = -Z_N I_N$$

Le courant de fuite I_R , toujours très faible, peut être négligé.

Si le neutre est mis directement à la terre, le courant I_N est très important et le courant I_C peut également être négligé :

- si le neutre est isolé, on a :

$$I_f = I_C$$

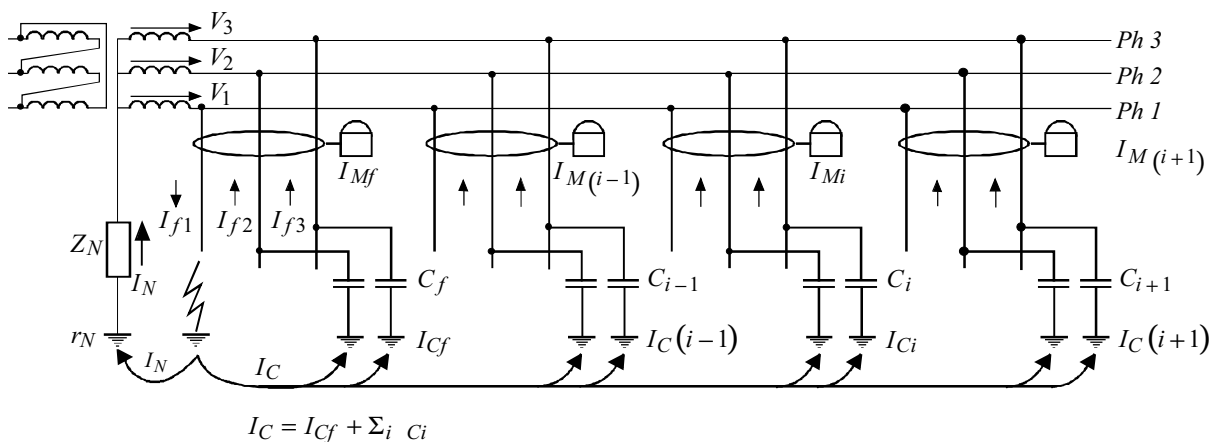
- si le neutre est impédant, on a :

$$I_f = I_N + I_C$$

La figure 2-5 donne les répartitions des courants dans le cas général.

Le tableau 2-2 donne les valeurs des courants dans le cas d'un défaut franc (résistance du défaut = 0).

Pour plus de détails sur les courants de défaut, on se reportera au chapitre 4.3. du *Guide des protections des réseaux industriels*.

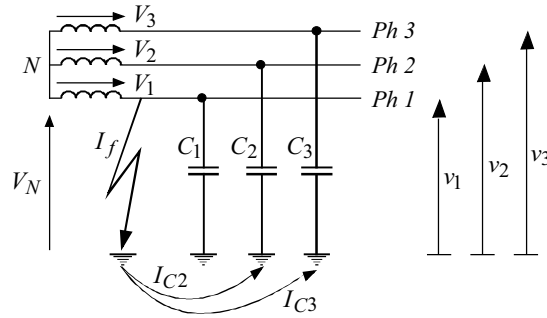


- I_{f1} : courant circulant dans le défaut
- I_N : courant circulant dans l'impédance de mise à la terre du neutre
- I_C : courant capacitif se refermant par les capacités phase-terre du réseau
- I_{Cf} : courant capacitif se refermant par les phases saines du départ en défaut
- I_{Ci} : courant capacitif se refermant par les phases saines des départs sains
- I_{Mf} : courant résiduel mesuré sur le départ en défaut
- I_{Mi} : courants résiduels mesurés sur les départs sains
- V_1, V_2, V_3 : tensions simples du réseau

Figure 2-5 : répartition des courants lors d'un défaut phase-terre

Neutre isolé

$$I_f = I_C = I_{C2} + I_{C3}$$



$$I_f = I_C = I_{C2} + I_{C3}$$

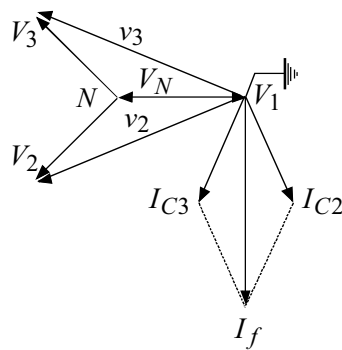
$$I_{C2} = j C \omega v_2$$

$$I_{C3} = j C \omega v_3$$

$$I_C = 3 j C \omega V_1$$

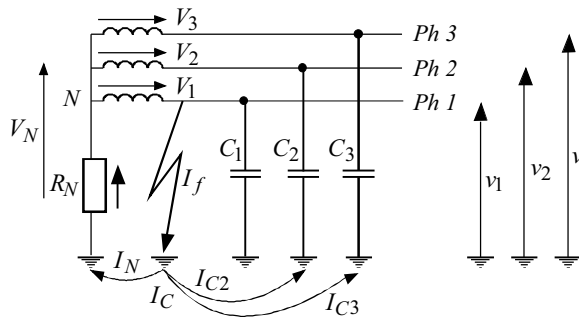
$$|I_f| = 3 C \omega |V_1|$$

$$I_f = I_C = I_{C2} + I_{C3}$$



Neutre mis à la terre par résistance

$$I_C = I_{C2} + I_{C3}$$



$$I_f = I_N + I_{C2} + I_{C3}$$

$$I_N = -\frac{V_1}{R_N}$$

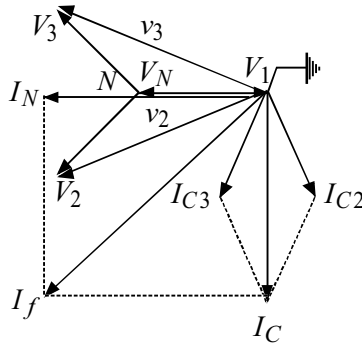
$$I_{C2} = j C \omega v_2$$

$$I_{C3} = j C \omega v_3$$

$$I_C = 3 j C \omega V_1$$

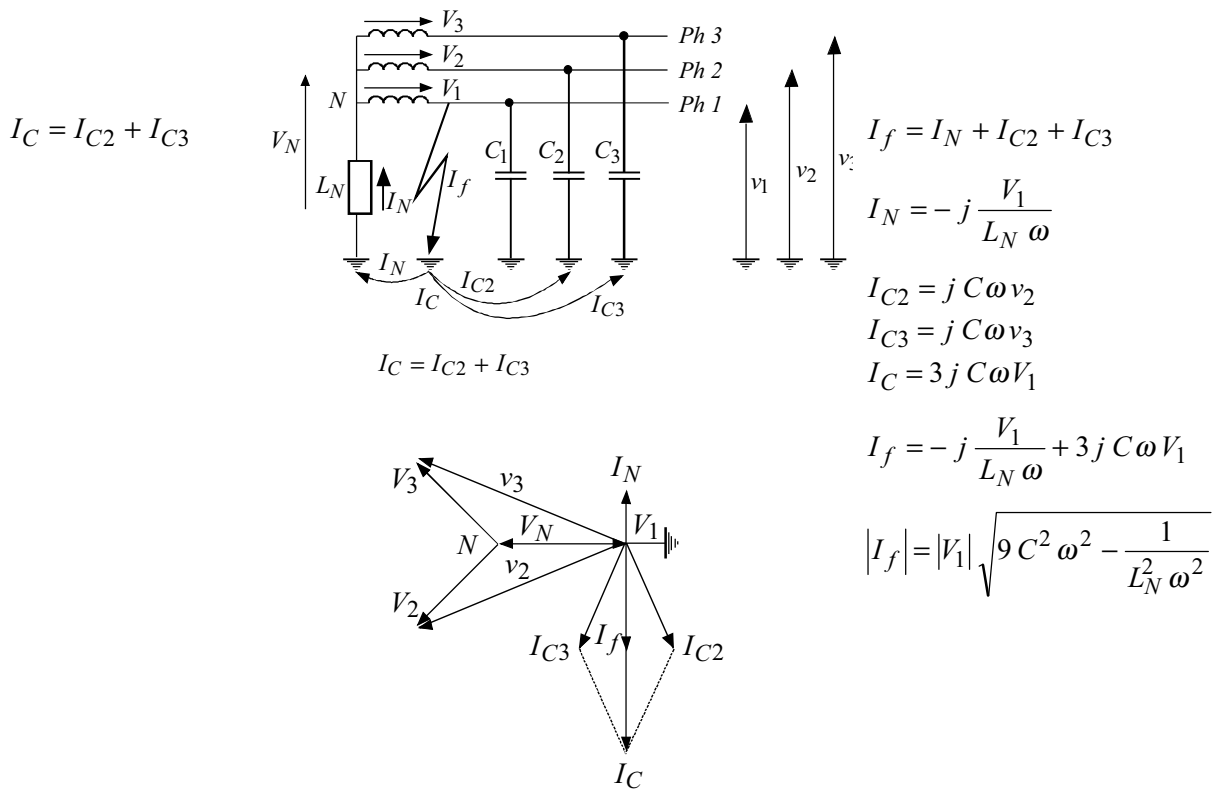
$$I_C = I_{C2} + I_{C3}$$

$$I_f = -\frac{V_1}{R_N} + 3 j C \omega V_1$$



$$|I_f| = |V_1| \sqrt{\left(\frac{1}{R_N}\right)^2 + 9 C^2 \omega^2}$$

Neutre mis à la terre par réactance



Neutre mis à la terre par bobine de Petersen

C'est le cas précédent, pour lequel :

$$3 C \omega = \frac{1}{L_N \omega}$$

ou : $3 L_N C \omega^2 = 1$

Le courant dans le défaut est nul, lorsque l'accord est parfait.

Tableau 2-2 : diagrammes vectoriels dans le cas d'un défaut franc à la terre

2.3.2.2. Tensions de contact

■ tension de contact - tension limite non dangereuse

Toute personne entrant en contact avec une pièce sous tension est soumise à une différence de potentiel : il y a donc pour elle un risque d'électrisation (on entend par électrisation, le fait de recevoir un choc électrique n'entraînant pas la mort). On distingue deux sortes de contacts : le contact direct et le contact indirect.

□ contact direct

C'est le contact d'une personne avec une partie active d'un matériel sous tension. Le contact peut avoir lieu avec une phase ou avec le neutre (voir fig. 2-6-a).

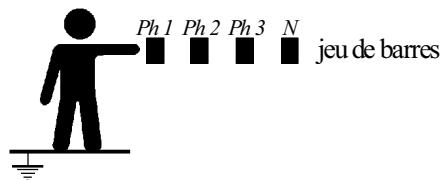
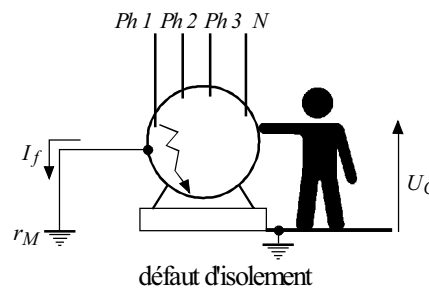


Figure 2-6-a : contact direct

□ contact indirect

C'est le contact d'une personne avec une masse d'un récepteur mise accidentellement sous tension à la suite d'un défaut d'isolement (voir fig. 2-6-b).



On a $U_C = r_M I_f$ car l'impédance de corps humain est très élevée devant r_M .

U_C : tension de contact

I_f : courant de défaut

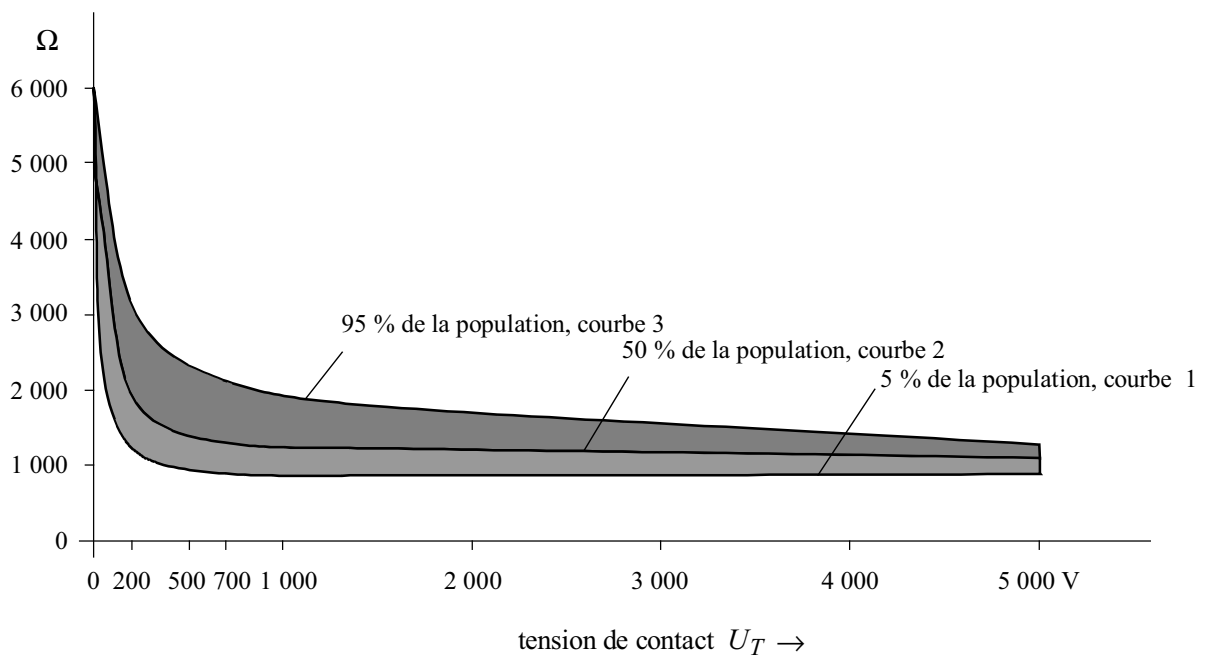
r_M : résistance de la prise de terre

Figure 2-6-b : contact indirect

Contrairement à une idée très répandue, le risque pour les personnes n'est pas lié uniquement à la valeur de la tension appliquée au corps humain, mais aussi à celle du courant susceptible de le traverser et à la durée du contact. Le courant et la tension sont liés par la loi d'Ohm $I = U / R$ où R est l'impédance du corps humain.

Cette impédance varie en fonction de la tension de contact, de l'état et de l'humidité de la peau, ainsi que du trajet du courant à l'intérieur du corps humain.

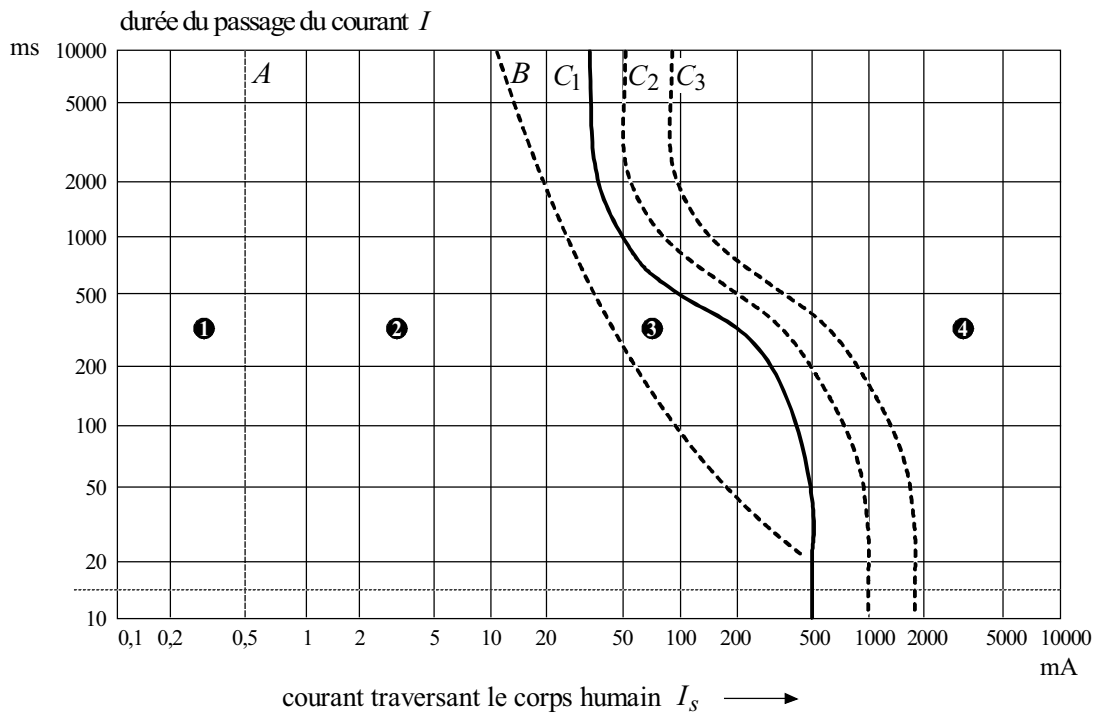
La publication CEI 479 indique les valeurs de l'impédance du corps humain en fonction de la tension de contact à laquelle il est soumis (voir fig. 2-7-a).



5 % de la population signifie que 5 % des personnes ont une impédance inférieure à la courbe 1.
 50 % de la population signifie que 50 % des personnes ont une impédance inférieure à la courbe 2.
 95 % de la population signifie que 95 % des personnes ont une impédance inférieure à la courbe 3.

Figure 2-7-a : valeurs statistiques des impédances totales du corps humain valables pour un trajet courant main à main ou main à pied

Cette même publication indique également les effets du courant électrique sur les personnes en fonction de sa valeur et de sa durée. Ces effets sont matérialisés sur la figure 2-7-b pour le courant alternatif à 50 ou 60 Hz.



- ❶ : non perception
- ❷ : perception
- ❸ : effets réversibles - crispation musculaire
- ❹ : possibilité d'effets irréversibles, danger de mort

Figure 2-7-b : effets du courant électrique 50/60 Hz

La courbe C1 définit la limite d'exposition temps-courant à un choc électrique, à ne pas franchir.

C'est sur ces données que l'on a établi les tableaux 2-3-a et 2-3-b fixant les temps théoriques maximum de coupure de l'alimentation en fonction de la tension de contact présumée, à laquelle est soumise une personne. Ils ont été construits à partir des graphiques 2-7-a et 2-7-b et en tenant compte d'une résistance additionnelle matérialisant le port de chaussures et le contact avec le sol. Ils permettent de définir, suivant la nature des locaux, les tensions limites conventionnelles U_L qui peuvent être maintenues sans danger pour les personnes : autrement dit, une tension de contact inférieure à U_L ne nécessite pas de coupure, par contre, toute tension de contact supérieure à U_L nécessite l'élimination du défaut dans un temps au plus égal à celui fixé par les tableaux 2-3-a et 2-3-b. Les tensions limites conventionnelles ont été fixées à 50 V pour les locaux secs et à 25 V pour les locaux humides.

Les temps de coupure à utiliser dans la pratique et les protections à mettre en oeuvre pour la coupure de l'alimentation dépendent des schémas des liaisons à la terre (TT, TN, IT). Ils sont précisés aux chapitres 2-5-1 et 2-5-2.

Temps théoriques de coupure en fonction de la tension de contact présumée

Tension de contact présumée (V)	Temps de coupure maximal du dispositif de protection (s)	
	courant alternatif	courant continu
< 50	5	5
50	5	5
75	0,60	5
90	0,45	5
120	0,34	5
150	0,27	1
220	0,17	0,40
280	0,12	0,30
350	0,08	0,20
500	0,04	0,10

Tableau 2-3-a : durée maximale de maintien de la tension de contact présumée dans les locaux secs ($U_L = 50$ V)

Tension de contact présumée (V)	Temps de coupure maximal du dispositif de protection (s)	
	courant alternatif	courant continu
25	5	5
50	0,48	5
75	0,30	2
90	0,25	0,80
110	0,18	0,50
150	0,12	0,25
230	0,05	0,06
280	0,02	0,02

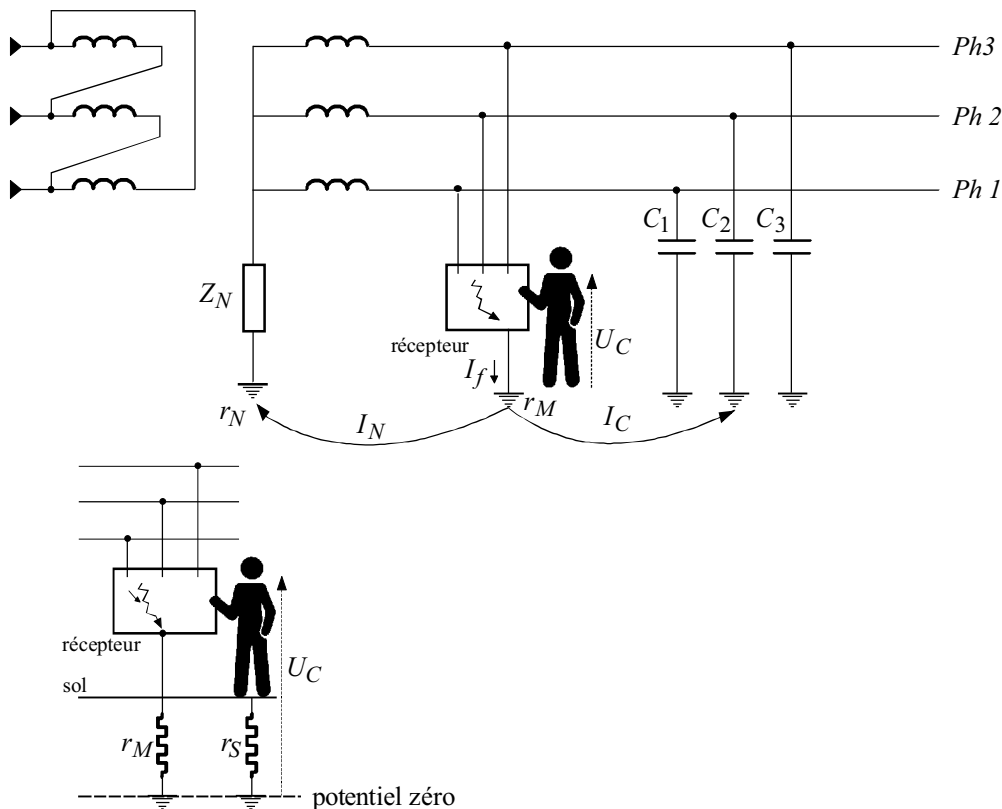
Tableaux 2-3-b : durée maximale de maintien de la tension de contact présumée dans les locaux humides à ($U_L = 25$ V)

■ tension de contact lors d'un défaut d'isolement

Supposons que dans un réseau, à la suite d'un défaut d'isolement, une phase vienne accidentellement en contact avec la masse d'un récepteur (voir fig. 2-8), il s'établit alors un courant de défaut I_f entre la masse du récepteur et la terre, et toute personne entrant en contact avec cette masse est soumise à une différence de potentiel U_C appelée tension de contact :

$$U_C = r_M I_f$$

Comme pour le courant de défaut, la tension de contact est étroitement liée à la valeur de l'impédance Z_N , donc au régime du neutre. Si le neutre est isolé, les valeurs du courant de défaut I_f et de la tension de contact U_C sont très faibles. La coupure de l'alimentation n'est alors pas nécessaire. Elles sont par contre élevées si le neutre est mis directement à la terre et la coupure de l'alimentation devient impérative.



- r_N : résistance de la prise de terre du neutre
- r_M : résistance de la prise de terre des masses
- r_S : résistance du sol
- I_f : courant de défaut
- U_C : tension de contact

Figure 2-8 : représentation de la tension de contact

2.3.2.3. Surtensions

En l'absence de défaut, tout réseau est le siège d'un régime permanent. Les tensions entre phases et entre phases et terre sont alors parfaitement maîtrisées et respectivement égales aux tensions composées et aux tensions simples.

L'apparition d'un défaut, un défaut phase-terre par exemple, entraîne une modification du régime permanent initial, on assiste à une élévation du potentiel des phases saines par rapport à la terre, et au développement de tensions transitoires qui peuvent occasionner le claquage de matériels, si leur niveau d'isolement n'a pas été correctement coordonné. Le régime du neutre joue un rôle déterminant dans le développement des surtensions consécutives à un défaut phase-terre. Les mécanismes sont multiples et complexes, pour une analyse plus détaillée, on se reportera au paragraphe 5.1.1.1. traitant des surtensions.

2.3.2.4. Dommages causés aux équipements

Les dommages que peuvent subir les équipements d'un réseau électrique présentant un défaut d'isolement sont liés aux valeurs des courants et des surtensions qui se développent dans le réseau à l'instant du défaut. On cherche donc à les limiter en présence de récepteurs sensibles.

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.

■ machines tournantes MT (voir chapitre 10.1.1. du Guide des protections)

Le défaut le plus fréquent affectant un alternateur ou un moteur haute tension est l'amorçage entre une phase et le circuit magnétique. Ce type de défaut est appelé "masse stator".

Lorsqu'un défaut masse stator se produit dans une machine, tout le courant de défaut phase-terre circule dans la phase en défaut et dans le circuit magnétique mis à la terre par l'intermédiaire de la carcasse. Au niveau du contact entre la phase en défaut et le circuit magnétique se développe un arc électrique, une énergie importante est dissipée, entraînant la détérioration du circuit magnétique et de l'isolation. L'importance des dommages dépend de la valeur du courant de défaut. L'expérience montre que des courants peu élevés, agissant pendant un temps très court, n'entraînent pas de défauts en profondeur dans le fer. On admet généralement qu'un courant de défaut inférieur à 20 ou 30 A n'entraîne pas de dommages importants et ne nécessite pas la réfection du circuit magnétique. Des essais ont montré qu'un défaut de 7,5 A pendant 10 minutes ne provoque pas de dégâts importants, mais que ceux-ci sont très sérieux pour un défaut de 200 A pendant 0,3 s.

Pour des durées de défaut inférieures à la seconde, la loi empirique :

$$I^4 t = cte$$

relie la valeur du courant de défaut au temps pendant lequel il peut être appliqué sans causer de dommages importants.

Pour réduire les risques dans un réseau moyenne tension comportant des moteurs et des alternateurs, on s'efforce généralement de limiter le courant de défaut phase-terre à une valeur de 20 A maximum en choisissant la mise à la terre du neutre par résistance de limitation.

La valeur de la résistance est déterminée de manière à limiter l'amplitude des surtensions transitoires se développant lors d'un défaut phase-terre, on a $I_r \geq 2 I_C$ (voir § 10.1.1.), avec :

I_r : courant circulant dans la résistance de mise à la terre du point neutre

I_C : courant capacitif du réseau

■ effets des courants de défauts sur les écrans des câbles MT

Les câbles moyenne tension, qu'ils soient à champ radial ou à ceinture, comportent tous des écrans métalliques reliés à la terre. Pour un câble à champ radial, un écran individuel entoure chaque conducteur ; dans un câble à ceinture, un écran collectif entoure les trois conducteurs (voir fig. 2-2-a et 2-2-b). Le mode de raccordement à la terre de ces écrans est traité au paragraphe 6.2.8.

Lors du claquage de l'isolant d'une phase, le conducteur et l'écran se trouvent pratiquement réunis : tout le courant de défaut s'écoule alors par l'écran qui doit être capable de le supporter sans dommage. Le courant de défaut étant directement lié au régime du neutre, on remarque son importance dans le choix et le dimensionnement des écrans, des câbles.

Les écrans peuvent être en cuivre ou en aluminium ; ils se présentent sous de multiples formes ; on trouve notamment :

- un ou plusieurs rubans de cuivre ou d'aluminium enroulés en hélice
- un ruban de cuivre ou d'aluminium de faible épaisseur posé en long
- une nappe de fils de cuivre ou d'aluminium
- une tresse de fils de cuivre.

Le plomb est également retenu pour constituer les écrans dans le cas de courants très importants, ou encore lorsqu'il est nécessaire de procurer à l'isolant une protection particulièrement efficace contre l'action de l'humidité ou de produits corrosifs.

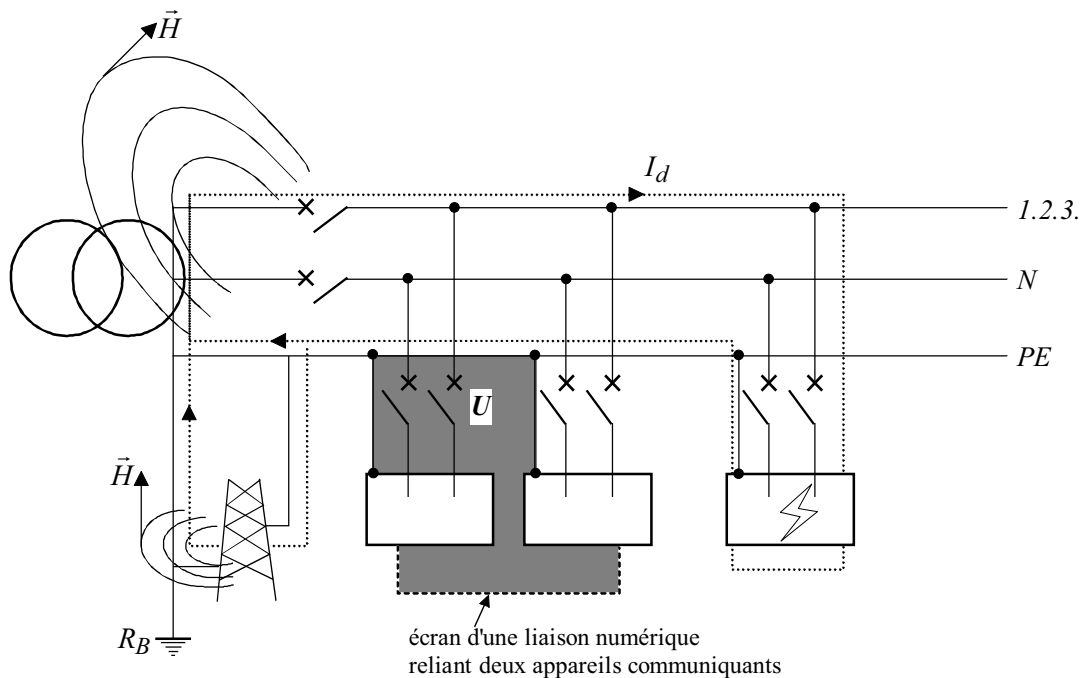
L'intensité admissible dans un écran dépend de sa nature, de sa section, de la nature de l'isolant avec lequel il est en contact et du temps pendant lequel il va être parcouru par le courant de défaut.

Dans tous les cas, il y a lieu de vérifier que l'écran est bien adapté aux conditions d'exploitation, le paragraphe 6.2.5. indique les courants de courte durée admissibles dans les écrans des câbles à isolation synthétique.

2.3.2.5. Perturbations électromagnétiques

Les schémas entraînant le développement de courants de défaut élevés et leur circulation dans les structures métalliques des bâtiments, en particulier le schéma *TNC* en basse tension favorisent l'apparition de champs magnétiques importants qui, par phénomène d'induction dans les boucles créées par les conducteurs de protection, peuvent perturber ou endommager certains équipements sensibles (fig. 2-9). Face à cette situation, on s'orientera vers des schémas permettant une bonne maîtrise des champs perturbateurs.

On veillera également à réduire la surface des boucles créées par l'ensemble des conducteurs contribuant à l'équipotentialité des masses.



\vec{H} : champ magnétique généré par la circulation des courants de défaut

U : tension induite dans une boucle constituée par les conducteurs de protection et les écrans des câbles

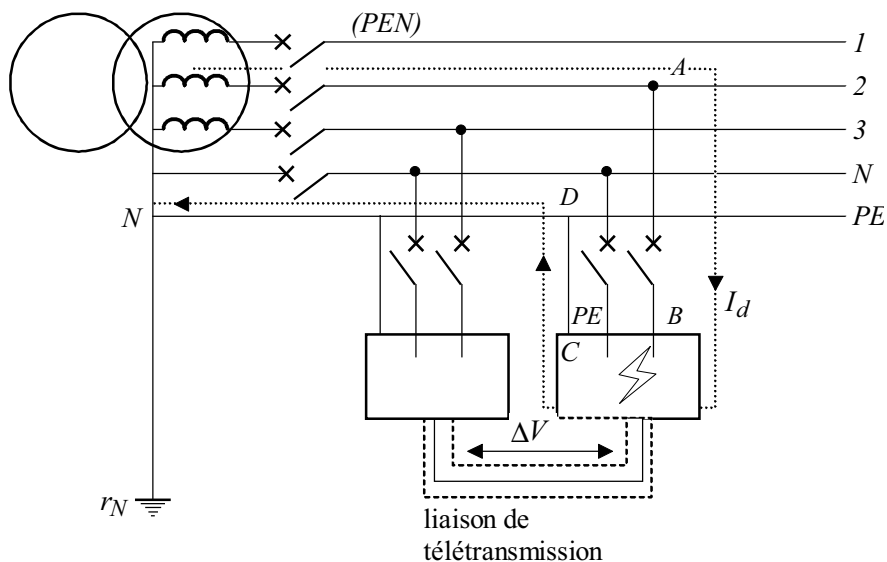
Figure 2-9 : perturbation par un champ magnétique rayonné

2.3.2.6. Différence de potentiel le long du conducteur de protection - Perturbation des systèmes communicants

Dans les schémas du type *TNC* et *TNS*, lors d'un défaut d'isolement, il peut se développer une tension importante le long du conducteur de protection reliant la masse du récepteur en défaut au circuit équipotentiel réalisant l'interconnexion de l'ensemble des masses de l'installation.

Les masses des récepteurs sains ne subissent pas nécessairement la même élévation de potentiel que celle du récepteur en défaut. Ainsi, il peut apparaître une différence de potentiel appréciable entre deux récepteurs et toute liaison de transmission d'information reliant ces deux récepteurs, peut être perturbée (voir fig. 2-10).

Dans le schéma *TNC* le courant de déséquilibre dû aux charges monophasées et les courants harmonique 3 et multiples de 3 circulent dans le conducteur de protection (*PEN*) (voir § 8) qui est le siège de différences de potentiel. L'équipotentialité des récepteurs n'est alors plus assurée et les liaisons de transmission d'information reliant des appareils communicants peuvent être perturbées ; le risque de perturbation est dans ce cas permanent (voir fig. 2-11).



Par souci de simplification, on suppose :

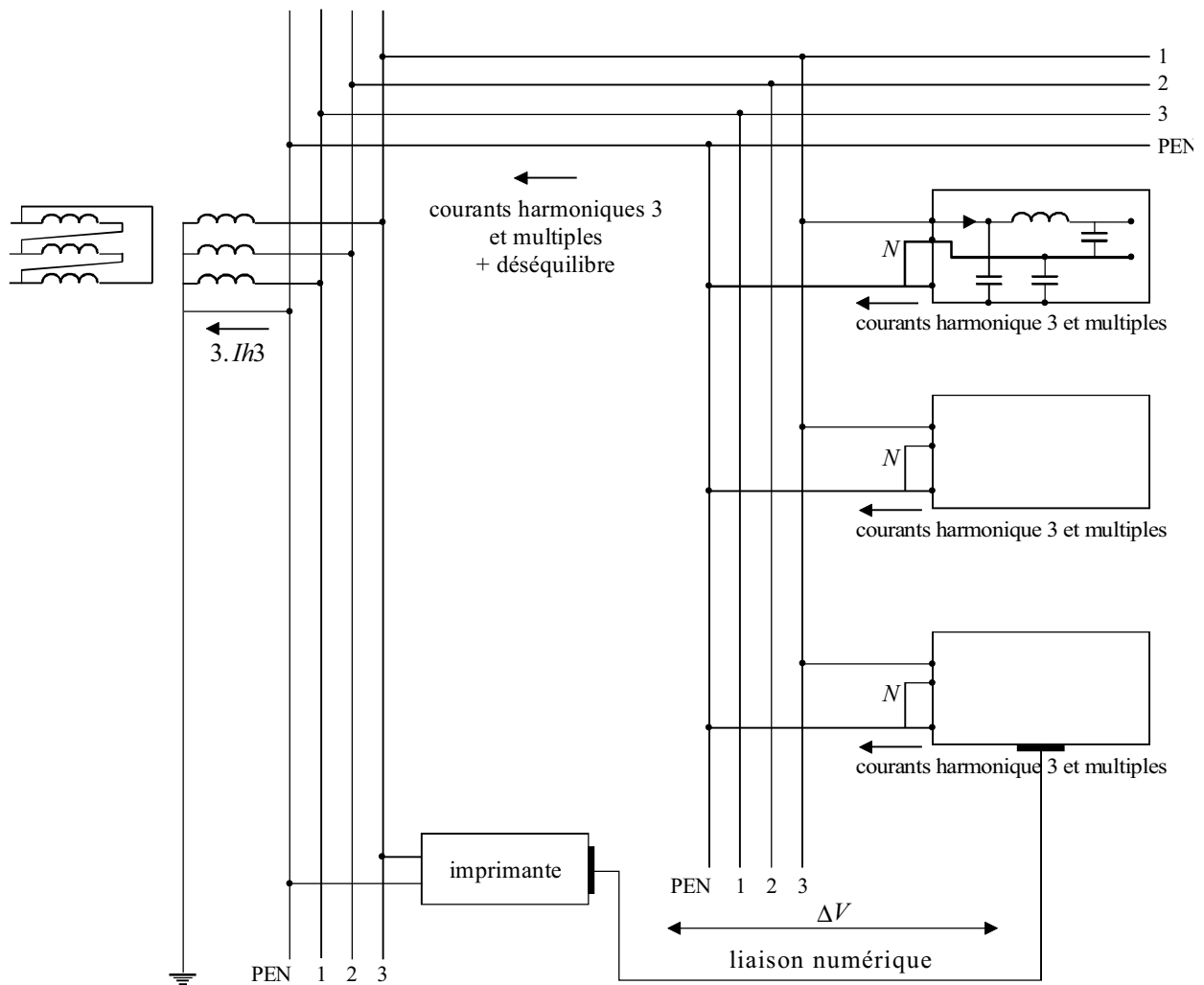
$$V_{AD} = 0,8 \text{ V}$$

V_{DN} : négligeable

le conducteur de protection *PE* de même longueur et de même section que les conducteurs de phase.

$$\text{On a alors : } \Delta V \cong \frac{0,8 \text{ V}}{2}$$

Figure 2-10 : chute de tension le long du conducteur de protection



ΔV : chute de tension due à la circulation des courants de déséquilibre, harmonique 3 et multiples de 3 dans le conducteur *PEN*

Figure 2-11 : effet de la circulation des courants de déséquilibre et des courants harmonique 3 et multiples de 3

2.3.2.7. Risque d'incendie ou d'explosion

Les schémas générant des courants de défaut importants doivent être évités dans les installations et locaux présentant des risques d'explosion ou d'incendie.

Il est établi qu'un courant de défaut de 500 mA peut porter à incandescence des parties conductrices de faible section et de ce fait provoquer un incendie ou une explosion. C'est la raison pour laquelle la norme C15-100 article 482-2-10 recommande, quel que soit le régime du neutre, l'utilisation de dispositifs différentiels résiduels ayant un réglage inférieur ou égal à 500 mA pour les locaux et installations à risque d'explosion ou d'incendie (voir fig. 2-12).

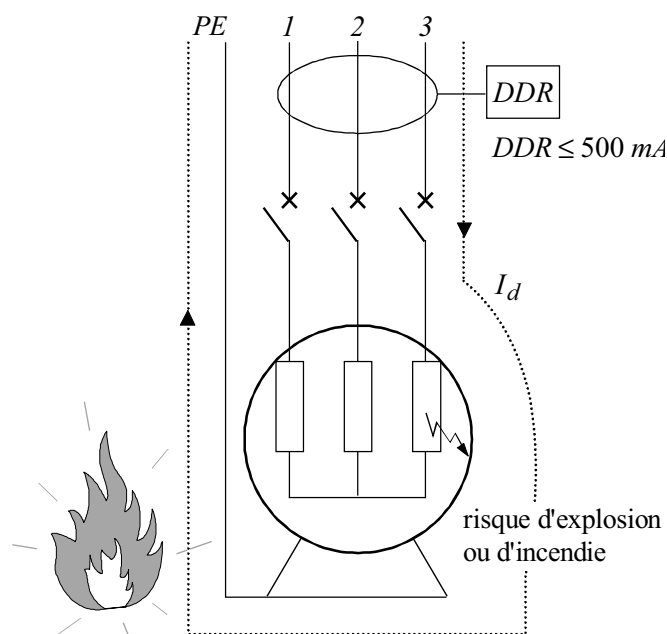


Figure 2-12 : risque d'incendie ou d'explosion

2.4. Régimes de neutre et schémas des liaisons à la terre utilisés en basse tension (1)

En basse tension, les régimes de neutre et les schémas des liaisons à la terre sont régis par les normes CEI 364 et NFC 15-100. Trois schémas sont pris en considération. Chaque schéma est défini par deux lettres.

La première lettre définit la situation du point neutre par rapport à la terre.

T : liaison directe du point neutre à la terre

I : point neutre, soit isolé de la terre, soit relié à la terre par une impédance de valeur élevée.

La deuxième lettre définit le mode de raccordement des masses de l'installation électrique :

T : les masses sont interconnectées et reliées directement à la terre, indépendamment de la mise à la terre éventuelle du point neutre

N : les masses sont reliées directement au conducteur neutre.

2.4.1. Neutre isolé ou impédant (schéma *IT*, figure 2-13)

Le neutre est isolé ou relié à la terre par une impédance de valeur élevée (première lettre *I*). Une impédance de 1 700 Ω est fréquemment employée.

Les masses des récepteurs sont interconnectées soit totalement, soit par groupes. Chaque groupe interconnecté est relié à une prise de terre (deuxième lettre *T*). Il est possible qu'une ou plusieurs masses soient reliées séparément à la terre.

Dans la mesure du possible, il est recommandé d'interconnecter toutes les masses d'une même installation et de les relier à la même prise de terre. Il est toutefois admis que des masses très éloignées les unes des autres, ou situées dans des bâtiments différents, ne le soient pas. Dans ce cas, chaque groupe de masses reliées à la même prise de terre, et chaque masse reliée individuellement à la terre doivent être protégés par un dispositif différentiel à courant résiduel.

Les prises de terre des masses et du neutre peuvent être ou non interconnectées ou confondues.

Il n'est pas avantageux de distribuer le neutre qui entraîne une limitation des longueurs maximales des canalisations (voir tableau 2-4).

L'installation d'un limiteur de surtensions entre le point neutre du transformateur HT/BT et la terre est obligatoire. Si le neutre n'est pas accessible, le limiteur de surtension est installé entre une phase et la terre. Il protège le réseau basse tension contre les élévations de tension résultant d'un amorçage entre les enroulements haute tension et basse tension du transformateur (voir § 5.3.2. - surtensions).

(1) Le terme schémas des liaisons à la terre tend à se généraliser

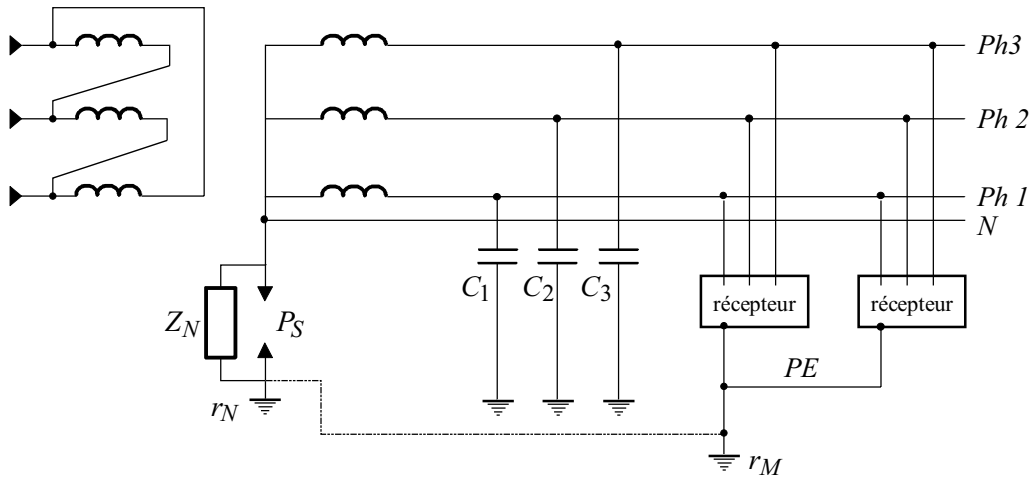


Figure 2-13 : neutre isolé ou impédant (schéma IT) en basse tension

2.4.2. Neutre mis directement à la terre (schéma TT, figure 2-14)

Le point neutre est relié directement à la terre (première lettre T).

Les masses des récepteurs sont interconnectées, soit toutes ensemble, soit par groupes, soit individuellement et sont reliées à la terre (deuxième lettre T). La protection est assurée au moyen de dispositifs différentiels résiduels. Toutes les masses protégées par le même dispositif de protection doivent être reliées à la mise prise de terre.

La prise de terre du neutre et celle des masses peuvent ou non être interconnectées ou confondues. Le neutre peut être distribué ou non.

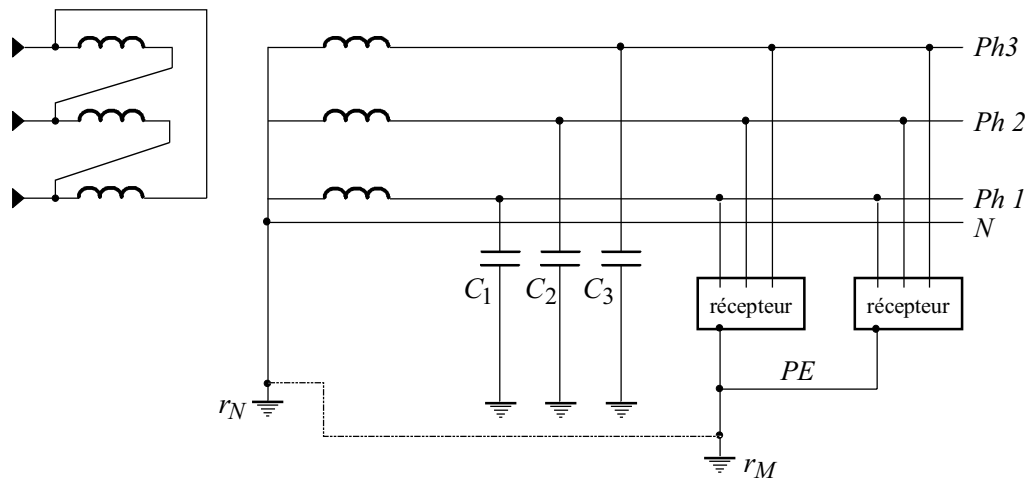


Figure 2-14 : neutre mis directement à la terre (schéma TT) en basse tension

2.4.3. Mise au neutre (schéma *TN*)

Le point neutre est relié directement à la terre (première lettre *T*).

Les masses des récepteurs sont reliées au conducteur neutre (deuxième lettre *N*).

On distingue deux schémas possibles suivant que le conducteur neutre (*N*) et le conducteur de protection (*PE*) sont confondus ou non.

■ premier cas

Les conducteurs de neutre et de protection sont confondus en un seul conducteur appelé *PEN*. Le schéma est identifié par une troisième lettre *C* et est noté *TNC* (voir fig. 2-15) :

- il est recommandé de relier le *PEN* régulièrement à la terre afin de limiter son niveau de potentiel par rapport au sol (voir § 2.3.2.6.)
- ce schéma est interdit pour les sections inférieures à 10 mm² cuivre et 16 mm² aluminium, ainsi que pour les canalisations mobiles. Il est également interdit en aval d'un schéma *TNS* (norme C 15-100, § 4.6.2.).

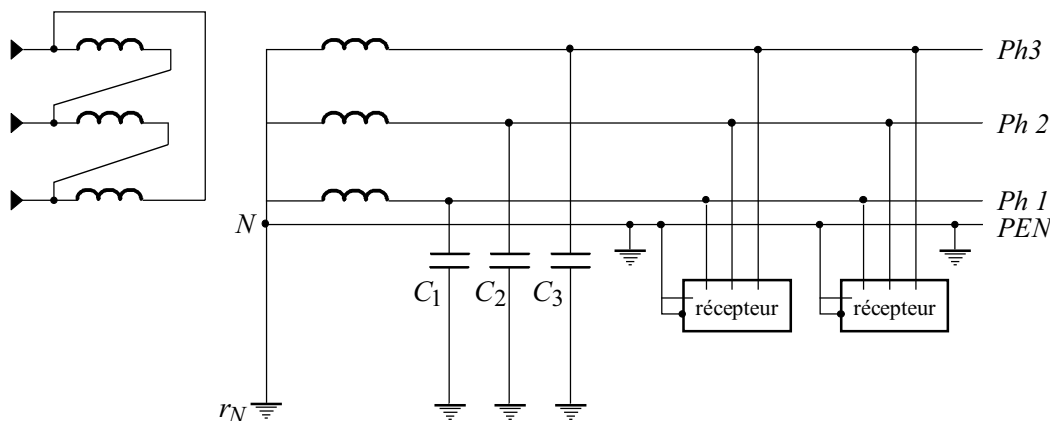


Figure 2-15 : schéma TNC

■ deuxième cas

Le conducteur de neutre et le conducteur de protection sont séparés. Le schéma est alors identifié par la troisième lettre S et est noté *TNS* (voir fig. 2-16).

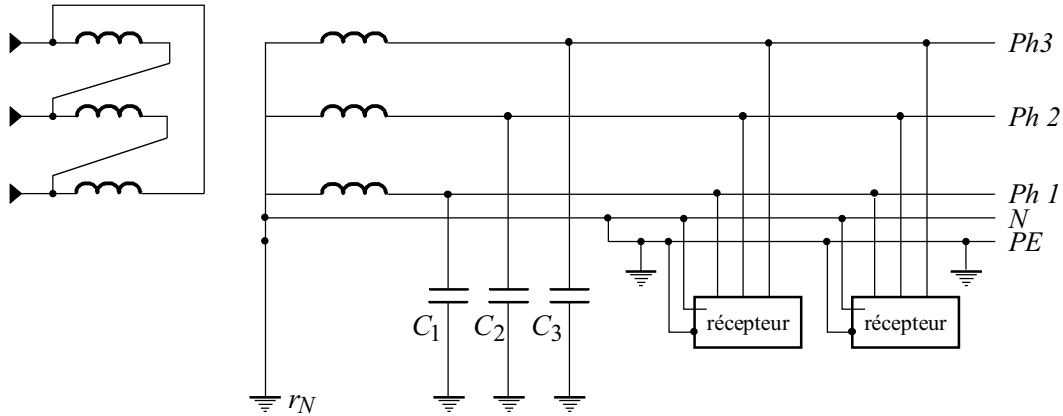


Figure 2-16 : schéma TNS

Des prises de terre doivent être réparties uniformément le long du conducteur de protection.

En *TN*, ce schéma est obligatoire pour des sections inférieures à 10 mm² cuivre ou 16 mm² aluminium, ainsi que pour les canalisations mobiles. Il est interdit en amont d'un schéma *TNC*.

Nota : les deux schémas *TNC* et *TNS* peuvent être utilisés dans une même installation. Mais le schéma *TNC* (4 fils) ne doit jamais être en aval du schéma *TNS* (5 fils) (voir fig. 2-17).

Comme précisé précédemment, la mise au neutre nécessite la création d'un système équipotentiel pour éviter la montée en potentiel des masses et des éléments conducteurs lors des défauts phase-terre. Il est, par conséquent, nécessaire de relier le conducteur *PEN* à de nombreuses prise de terre réparties dans l'installation.

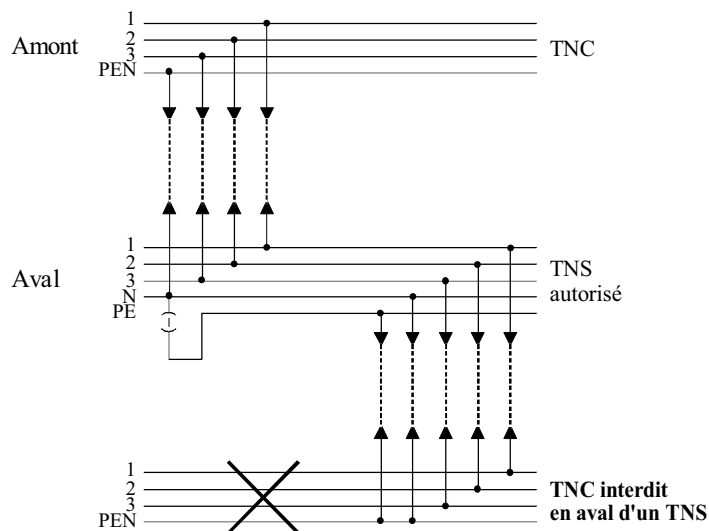


Figure 2-17 : combinaison des schémas TNC et TNS

2.5. Le contact indirect en basse tension suivant le régime du neutre

2.5.1. Neutre isolé

■ tension de contact se développant lors du premier défaut d'isolement (voir fig. 2-18)

On suppose un réseau initialement bien isolé. Lorsqu'il se produit un premier défaut d'isolement sur une phase, le courant de défaut I_f est égal au courant capacitif se refermant par les phases saines.

Supposons un réseau très étendu comportant 10 km de câble ; la capacité entre chaque phase et la terre est alors d'environ 2,5 μF et le courant de défaut a pour valeur :

$$|I_f| = 3 C \omega V \cong 520 \text{ mA} , \text{ en négligeant } r_M \text{ et } r_S \text{ devant } \frac{1}{C \omega}$$

Si $r_M = 10 \Omega$, les masses interconnectées sont toutes portées au potentiel :

$$U_C = r_M I_f = 0,52 \times 10 = 5,2 \text{ V}$$

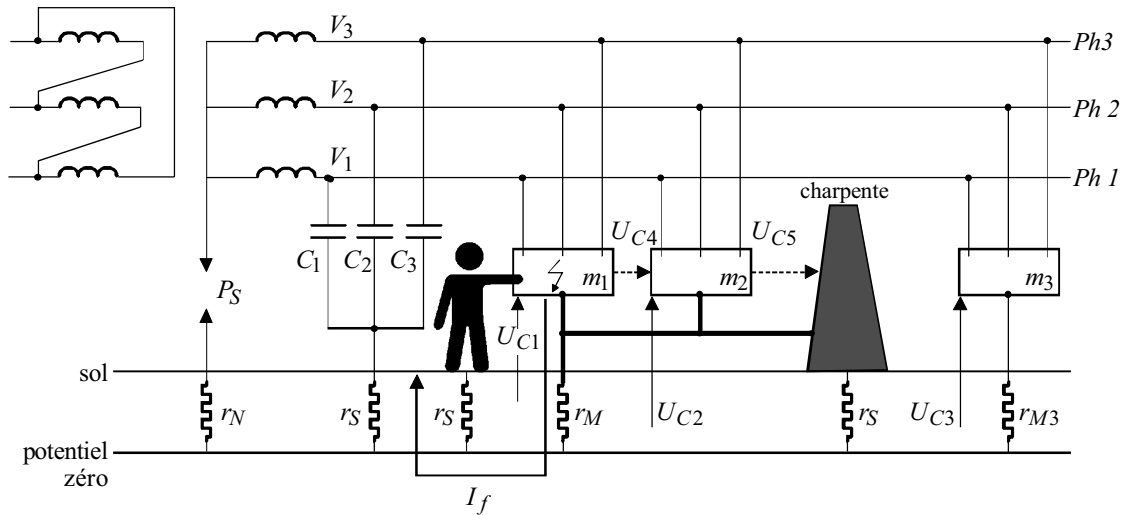
Ce potentiel n'est pas dangereux. La tension apparaissant entre deux masses voisines simultanément accessibles est négligeable. La montée en potentiel d'une masse très éloignée non interconnectée est nulle.

Un réseau à neutre isolé, même très étendu, ne présente pas de danger en présence d'un premier défaut d'isolement ; l'exploitation peut se poursuivre sous réserve que le défaut soit signalé, recherché et éliminé.

Toutefois, dans le cas d'un réseau alimentant de nombreux récepteurs présentant un courant de fuite capacitif phase-terre important (équipements informatiques par exemple), il y aura lieu de vérifier que la tension de contact qui se développe lors du premier défaut d'isolement est inférieure à la tension limite de sécurité U_L :

$$U_C = r_M I_f < U_L$$

$U_L = 50 \text{ V}$ pour les locaux secs, 25 V pour les locaux humides.



- r_N : résistance de la prise de terre du neutre
 r_M : résistance de la prise de terre des masses
 r_{M3} : résistance de la prise de terre d'une masse éloignée non interconnectée
 r_S : résistance du sol
 C_1, C_2, C_3 : capacités phase-terre
 I_f : courant de défaut
 U_{C1}, U_{C2}, U_{C3} : tensions de contact par rapport au sol
 U_{C4}, U_{C5} : tension de contact entre deux masses simultanément accessibles

Figure 2-18 : tensions de contact dans un réseau à neutre isolé lors du premier défaut d'isolement

■ tension de contact se développant lors du deuxième défaut d'isolement (voir fig. 2-19)

Lorsqu'il se produit un deuxième défaut d'isolement, il s'établit entre les masses m_1 et m_2 un courant de défaut I_f .

Ce courant circule dans les conducteurs de phase et les conducteurs de protection qui assurent l'interconnexion des masses. Il n'est limité que par l'impédance de la boucle de défaut *ABCDEFGHJJ*.

Supposons :

- le premier récepteur alimenté par un câble cuivre de 50 mm² ayant une longueur de 50 m et le second par un câble cuivre de 25 mm² et 30 m de long
- les conducteurs de protection de même longueur et de même section que les conducteurs de phase
- une impédance nulle pour le tronçon FE.

Si on néglige les réactances, l'impédance Z_B de la boucle $ABCDEFGHJIJ$ est alors égale à :

$$Z_{boucle} = 2 \left[\rho \times \left(\frac{30}{25} + \frac{50}{50} \right) \right]$$

$$= 2 \times 22,5 \times 10^{-3} \times 2,2$$

$$= 99 \text{ m}\Omega$$

avec :

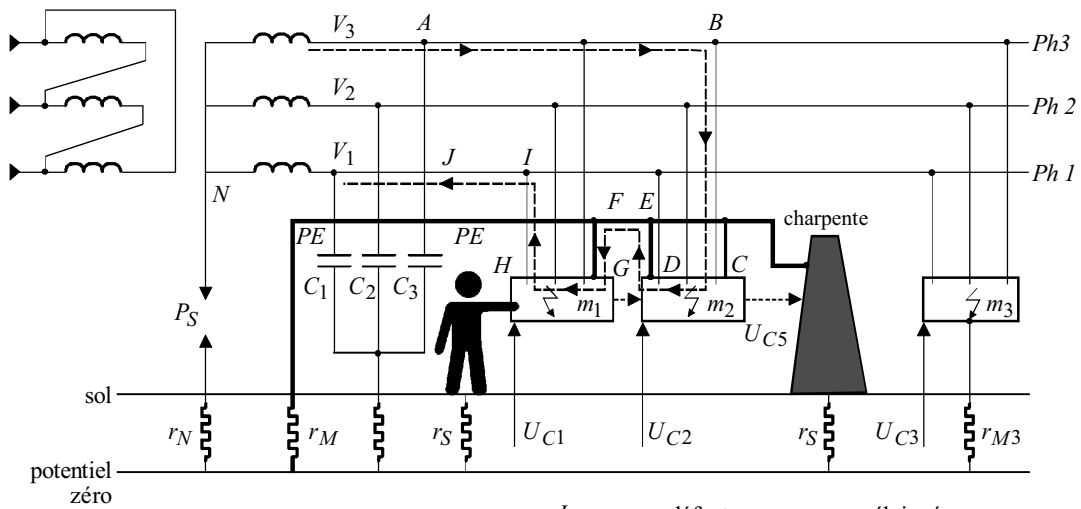
$$\rho = 22,5 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m} \text{ (résistivité du cuivre).}$$

En prenant :

$$U_{BI} = 0,8U = 400 \times 0,8 = 320 \text{ V}$$

pour tenir compte des liaisons AB et IJ , on a :

$$I_f = \frac{320}{99 \times 10^{-3}} = 3232 \text{ A}$$



I_f pour un défaut sur une masse éloignée

- r_N : résistance de la prise de terre du neutre
- r_M : résistance de la prise de terre des masses
- r_{M3} : résistance de la prise de terre des masses éloignées non interconnectées
- r_S : résistance du sol
- C_1, C_2, C_3 : capacités phase-terre
- I_f : courant de défaut
- U_{C1}, U_{C2}, U_{C3} : tensions de contact par rapport au sol
- U_{C4}, U_{C5} : tension de contact entre deux masses simultanément accessibles
- $ABCDEFGHJIJ$: boucle de défaut

Figure 2-19 : tension de contact dans un réseau à neutre isolé lors d'un deuxième défaut d'isolement

Publication, traduction et reproduction totales ou partielles de ce document sont rigoureusement interdites sauf autorisation écrite de nos services.
The publication, translation and reproduction, either wholly or partly, of this document are not allowed without our written consent.

La tension apparaissant alors entre les masses m_1 et m_2 est égale à :

$$Z_{DG} I_f = Z_{boucle} / 2 \times I_f = 159 V$$

La masse m_1 est portée à un potentiel :

$$\begin{aligned} Z_{FG} I_f &= \left(\rho \frac{50}{50} \right) I_f = 22,5 10^{-3} I_f \\ &= 22,5 10^{-3} \times 3 232 \\ &= 73 V \end{aligned}$$

et la masse m_2 à un potentiel :

$$\begin{aligned} Z_{ED} I_f &= \left(\rho \frac{30}{25} \right) I_f \\ &= 22,5 10^{-3} \times 1,2 \times 3 232 \\ &= 87 V \end{aligned}$$

La masse m_3 non interconnectée ne subit aucune élévation de potentiel.

Dans le cas où le deuxième défaut se produit sur une masse éloignée non interconnectée, le courant de défaut I_f se referme alors par la terre et est limité par les résistances des prises de terre r_M et r_{M3} .

Si $r_M = 10 \Omega$ et $r_{M3} = 15 \Omega$ par exemple, les masses interconnectées sont portées à un potentiel :

$$\frac{U}{r_M + r_{M3}} r_M = 160 \text{ volts}$$

et la masse éloignée à un potentiel :

$$\frac{U}{r_M + r_{M3}} r_{M3} = 240 \text{ volts}$$

Dans tous les cas, les tensions de contact sont dangereuses et il est nécessaire de couper l'alimentation.

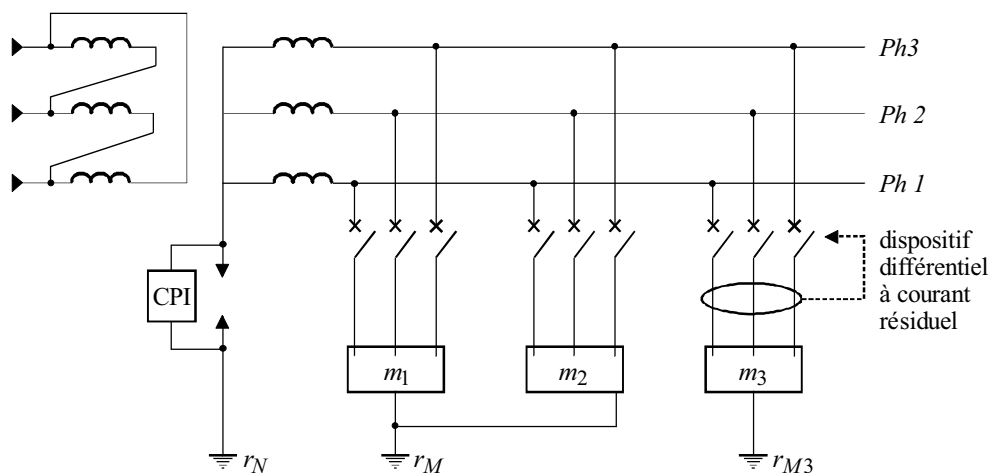
Dans un réseau à neutre isolé, les tensions de contact qui se développent lors d'un premier défaut d'isolement ne sont pas dangereuses. Elles ne le deviennent qu'en présence d'un deuxième défaut d'isolement qui impose la coupure de l'alimentation.

Les règles d'exploitation d'un réseau à neutre isolé sont les suivantes :

- surveillance permanente de l'isolement par un contrôleur de l'isolement
- signalisation du premier défaut d'isolement, suivie de sa recherche et de son élimination par un personnel compétent
- coupure obligatoire au deuxième défaut d'isolement.

La coupure est normalement obtenue par les dispositifs assurant la protection contre les défauts entre phases (disjoncteurs, fusibles, etc...). Il faut vérifier que le courant qui se développe lors d'un deuxième défaut est suffisamment élevé pour faire fonctionner ces dispositifs. C'est la raison pour laquelle il est nécessaire d'interconnecter entre elles toutes les masses de l'installation par des conducteurs de protection de manière à maîtriser les impédances des boucles dans lesquelles se développent les courants de défaut.

Comme mentionné précédemment, des masses éloignées peuvent ne pas être interconnectées avec les autres. Dans ce cas, les courants qui se développent en présence de deux défauts d'isolement ne sont plus capables de faire fonctionner les dispositifs de protection contre les défauts entre phases. Le déclenchement est alors obtenu par des dispositifs de protection à courant différentiel résiduel. Un dispositif de ce type doit être installé sur chaque départ alimentant un récepteur, ou un groupe de récepteurs dont les masses ne sont pas interconnectées avec celles des autres récepteurs (voir fig. 2-20).



CPI : contrôleur permanent de l'isolement

Masses interconnectées : protection au deuxième défaut par les dispositifs de protection contre les défauts entre phases

Masses non interconnectées : protection au deuxième défaut par un dispositif de protection à courant différentiel résiduel

Figure 2-20 : emploi de dispositifs différentiels à courant résiduel pour la protection des récepteurs

Dans les cas où les masses sont interconnectées, il est possible qu'au deuxième défaut, le déclenchement des dispositifs de protection contre les défauts entre phases (disjoncteurs, fusibles, etc...) ne soit pas obtenu.

C'est le cas lorsque l'impédance de la boucle de défaut est trop élevée, en raison de la longueur excessive des câbles par exemple ; la protection doit alors être assurée par d'autres dispositifs, dispositifs de protection à courant différentiel résiduel par exemple, ou par la mise en place de mesures particulières. Ces mesures sont exposées au chapitre 2.5.1.1. - mise en oeuvre du schéma *IT*.

La vérification du fonctionnement des dispositifs de protection contre les défauts entre phases peut être effectuée par la méthode simplifiée suivante qui suffit dans la majorité des cas et permet des vérifications par des calculs "manuels" simples (voir tableau 2-4-a et 2-4-b).

Il existe des méthodes plus élaborées, elles mettent en oeuvre un calcul précis des courants de défaut et font appel à des logiciels spécialisés.

On applique la loi d'Ohm à la boucle de défaut avec les hypothèses suivantes :

- pour tenir compte des impédances amont, on suppose que la tension entre le conducteur en défaut et le conducteur de protection à l'origine du circuit en défaut est égale à 80 % de la tension nominale.
- devant l'impossibilité pratique d'effectuer la vérification pour l'ensemble des configurations de double défaut, chaque circuit est pris séparément. On le suppose en défaut avec un circuit identique. L'impédance de la boucle de double défaut est alors égale au double de celle du circuit étudié.
- on néglige les réactances pour les sections < 150 mm², pour les sections de 150 mm² et plus les résistances sont affectées des coefficients suivants :

$$\cdot 150 \text{ mm}^2 : R \times 1,15$$

$$\cdot 185 \text{ mm}^2 : R \times 1,20$$

$$\cdot 240 \text{ mm}^2 : R \times 1,25$$

$$\cdot 300 \text{ mm}^2 : R \times 1,30$$

Le calcul conduit à vérifier que la longueur de chaque circuit est inférieure à une valeur maximale donnée par les relations ci-dessous (voir tableaux 2-4-a et 2-4-b).

Si le conducteur neutre n'est pas distribué :

$$L_{\max} = \frac{0,8 U S_{ph}}{2 \rho (1 + m) I_{magn.} \text{ (ou } I_{fus} \text{)}}$$

Si le conducteur neutre est distribué :

$$L_{\max} = \frac{0,8 V S_1}{2 \rho (1 + m) I_{magn.} \text{ (ou } I_{fus} \text{)}}$$

I_{magn} et I_{fus} sont les courants qui assurent le fonctionnement des dispositifs de protection en un temps inférieur au temps de coupure maximum correspondant à la tension de contact U_C qui se développe au niveau du récepteur en défaut.

Dans la pratique, par souci de simplification, la norme CEI 364 a admis de ne pas tenir compte de la tension de contact présumée se développant au niveau du récepteur en défaut et a adopté des temps de coupure constants dépendant de la tension nominale du réseau basse tension (voir tableau 2-5).

Tension nominale $U_0 (V_{CA})$	Temps de coupure (s)	
	Neutre non distribué	Neutre distribué
120 - 127	0,8	5
220 - 230	0,4	0,8
400	0,2	0,4
580	0,1	0,2

Tableau 2-5 : temps de coupure en fonction de la tension nominale du réseau

Il faut préciser que ces temps sont respectés de fait que l'on utilise des disjoncteurs, en effet, le temps de fonctionnement d'un disjoncteur sur action de son magnétique est de l'ordre de 20 ms maximum. Il suffit donc de vérifier que le courant de défaut qui se développe dans la boucle de défaut est supérieur au seuil de fonctionnement du magnétique. Dans le cas de l'utilisation de disjoncteurs retardés, il est impératif que le retard ne soit pas supérieur aux valeurs du tableau 2-5.

Cas du neutre non distribué

b) On considère que les deux circuits en défaut ont la même impédance

$$R_{AH} = 2 \rho L \left(\frac{1}{S_{ph}} + \frac{1}{S_{PE}} \right)$$

$$R_{AH} = 2 \rho L \frac{1}{S_{ph}} (1 + m)$$

$$m = S_{ph} / S_{PE}$$

c) I_f doit être supérieur à $I_{magn.}$ pour que la protection des personnes soit assurée, d'où :

$$I_{magn.} < \frac{0,8 U S_{ph}}{2 \rho L (1 + m)}$$

a) Pour le circuit en défaut, on a :

$$I_f = \frac{U_{AH}}{R_{AH}}$$

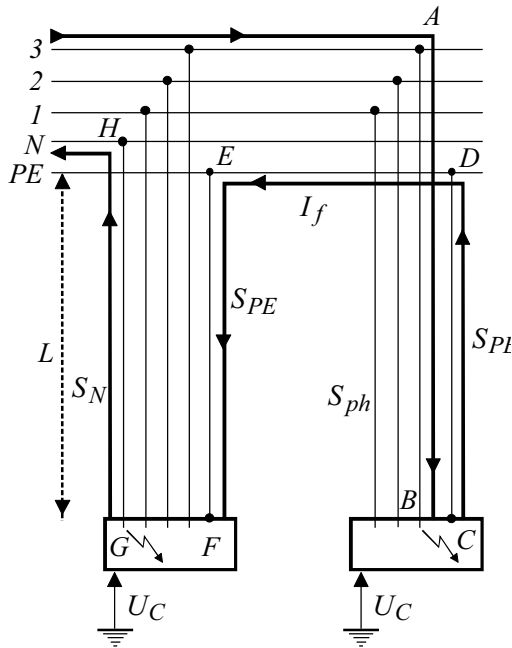
$$U_{AH} = 0,8 U \text{ par hypothèse}$$

$$L_{max} = \frac{0,8 U S_{ph}}{2 \rho (1 + m) I_{magn.}}$$

$$U_C = R_{CD} I_f = \frac{\rho L}{S_{PE}} I_f = \frac{0,4 U m}{1 + m}$$

Tableau 2-4-a : vérifications des conditions de déclenchement en schéma IT dans le cas du neutre non distribué

Cas du neutre distribué



$$I_{magn.} < \frac{0,8 V S_{ph}}{2 \rho L (1 + m)}$$

$$L_{max} = \frac{0,8 V S_{ph}}{2 \rho (1 + m) I_{magn.}}$$

$$U_C = R_{CD} I_f = \frac{\rho L}{S_{PE}} I_f = 0,4 V \frac{m}{1 + m}$$

c) Pour le circuit B comprenant le neutre, on écrit :

$$I_f = \frac{U_{AH}}{R_{AH}}$$

$$U_{AH} = 0,8 V \text{ par hypothèse}$$

$$R_{AH} = 2 \rho L \left(\frac{1}{S_N} + \frac{1}{S_{PE}} \right)$$

$$R_{AH} = \frac{2 \rho L}{S_N} (1 + m)$$

$$\text{avec } m = S_N / S_{PE}$$

$$I_{magn.} < \frac{0,8 V S_N}{2 \rho L (1 + m)}$$

$$L_{max} = \frac{0,8 V S_N}{2 \rho (1 + m) I_{magn.}}$$

$$U_C = R_{EF} I_f = \frac{\rho L}{S_{PE}} I_f = 0,4 V \frac{m}{1 + m}$$

a) On considère le premier défaut sur une phase, et le second sur le neutre

b) Pour le circuit A ne comprenant pas le neutre, on écrit :

$$I_f = \frac{U_{AH}}{R_{AH}}$$

$$U_{AH} = 0,8 V \text{ par hypothèse}$$

$$R_{AH} = 2 \rho L \left(\frac{1}{S_{ph}} + \frac{1}{S_{PE}} \right)$$

$$= \frac{2 \rho L}{S_{ph}} (1 + m)$$

avec $m = S_{ph} / S_{PE}$

Tableau 2-4-b : vérifications des conditions de déclenchement en schéma IT dans le cas du neutre distribué

ABCDEFGHI : boucle de défaut

I_f : courant de défaut

L : longueur des câbles

L_{\max} : en mètres

V : tension simple en volts (220 V pour un réseau 220/380 V)

U : tension composée en volts (380 V pour un réseau 220/380 V)

U_C : tension de contact

S_{ph} : section des phases en mm^2

$S_1 = S_{ph}$ si le circuit considéré ne comporte pas de neutre,

$S_1 = S_N$ si le circuit comporte le neutre

S_N : section du conducteur neutre

S_{PE} : section du conducteur de protection

ρ : résistivité à la température de fonctionnement normal

$\rho = 27 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ pour le cuivre = 1,5 fois la résistivité à 20°C

$\rho = 43 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ pour l'aluminium = 1,5 fois la résistivité à 20°C

$$m = \frac{S_{ph} \text{ (ou } S_1)}{S_{PE}}$$

$I_{\text{magn.}}, I_{\text{fus}}$: courants assurant le fonctionnement des dispositifs de protection en un temps inférieur au temps de coupure correspondant à la tension de contact se développant au niveau du récepteur en défaut.

Tableau 2-4-c : légende des tableaux 2-4-a et 2-4-b

2.5.1.1. Mise en oeuvre du schéma *IT* et exploitation

■ dispositions générales

Le schéma *IT* n'exige pas la coupure automatique de l'alimentation dès l'apparition d'un défaut d'isolement, appelé "premier défaut".

En effet, on a vu que pour ce schéma les tensions de contact qui se développent lors d'un premier défaut d'isolement ne sont pas dangereuses pour les personnes.

Ainsi l'exploitation peut continuer malgré le "premier défaut", ce qui accroît la continuité de service.

Ce schéma nécessite la mise en oeuvre des mesures suivantes :

- installation d'un contrôleur permanent de l'isolement (*CPI*) , imposé par le paragraphe 413-1-5-4 de la NF C 15-100, qui doit signaler le "premier défaut" (signal sonore ou visuel ou les deux).
- recherche du premier défaut d'isolement par un service d'entretien efficace afin de tirer tous les avantages de ce schéma. Cette recherche doit être effectuée dans les huit heures qui suivent l'apparition du défaut, elle peut être facilitée par l'utilisation de matériels de localisation automatique.
- déclenchement dès l'apparition de tout nouveau défaut appelé "second défaut".
- vérification des conditions de déclenchement des dispositifs de protection contre les défauts entre phases, avec mise en place de mesures particulières si ces conditions ne peuvent pas être garanties (voir § dispositions particulières).
- installation, en tête de l'installation, d'un dispositif de limitation des surtensions branché entre le neutre et la terre ou entre une phase et la terre.

■ surveillance de l'isolement et aide à la localisation du premier défaut

Des systèmes de surveillance de l'isolement et d'aide à la recherche du premier défaut ont été développés, ils procurent une réduction importante des opérations d'entretien et de maintenance.

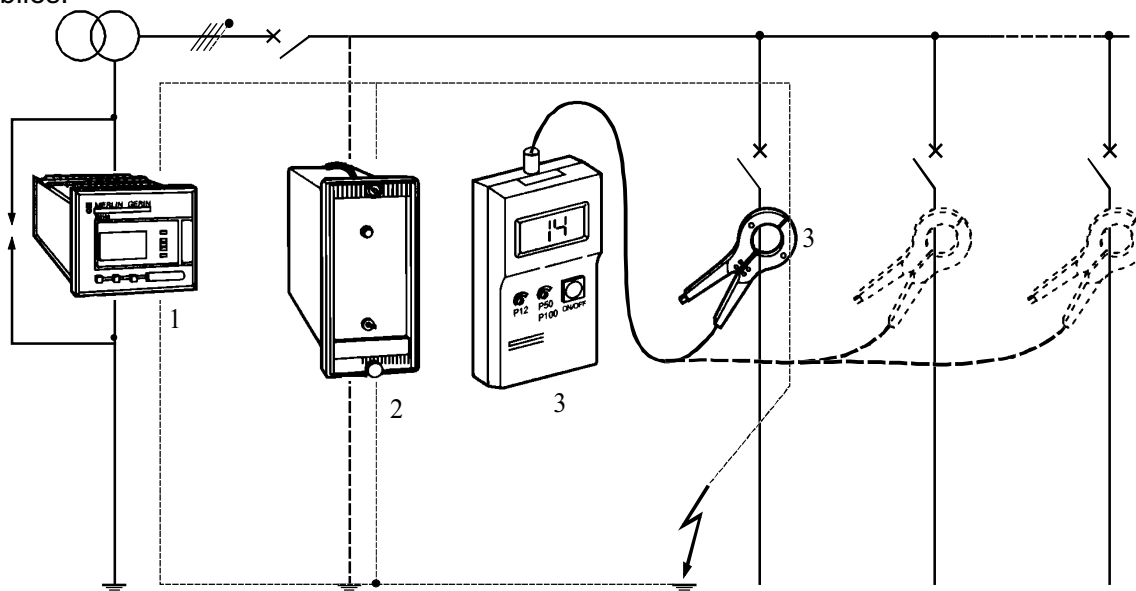
Le principe mis en oeuvre consiste à appliquer, au moyen d'un générateur approprié, une faible tension basse fréquence ou continue, entre le réseau à surveiller et la terre. Lorsque l'isolement baisse un courant de fuite s'établit, sa mesure permet d'évaluer le niveau d'isolement du réseau et de localiser la position d'un défaut éventuel.

Seuls les systèmes injectant un signal basse fréquence permettent la localisation des défauts, ils peuvent indifféremment être utilisés sur les installations à courant continu et alternatif, certains peuvent faire la distinction entre la partie résistive et la partie capacitive du courant à la terre, et ainsi effectuer une véritable mesure de la résistance d'isolement du réseau.

Les réalisations modernes permettent la mesure permanente de la résistance d'isolement de chaque circuit ; la prévention du premier défaut devient ainsi possible. Les mesures effectuées dans l'installation sont transmises par liaison numérique à une centrale de traitement qui élabore l'ensemble des informations nécessaires aux exploitants.

□ exemple 1 : recherche mobile manuelle (voir fig. 2-21)

Le générateur peut être fixe ou mobile, le détecteur ainsi que la pince ampèremétrique sont mobiles.

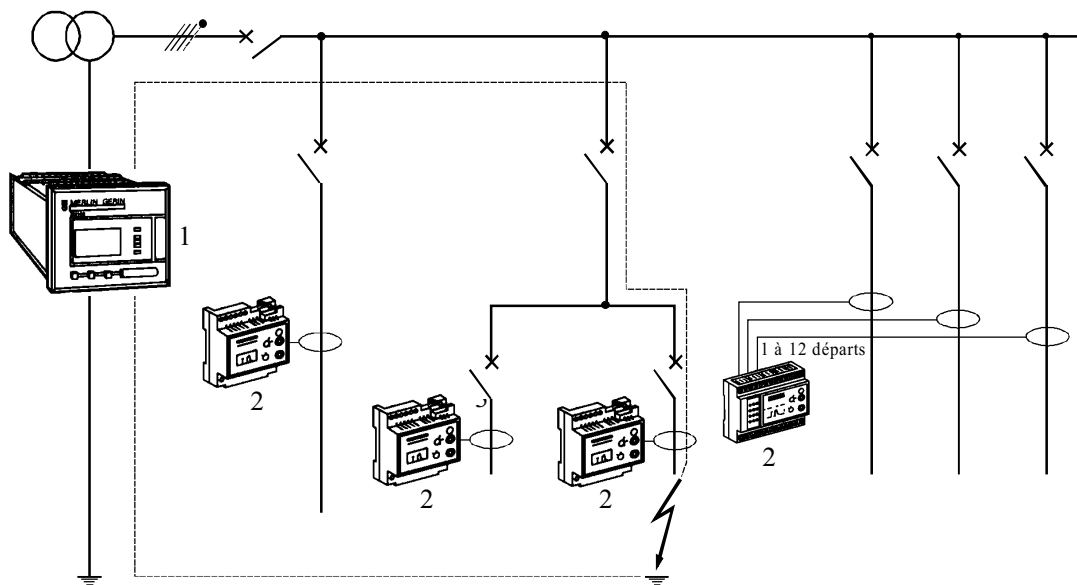


- 1 : générateur fixe *BF*
- 2 : générateur mob *BF*
- 3 : détecteur et pince ampèremétrique mobiles

Figure 2-21 : recherche mobile manuelle

□ exemple 2 : recherche fixe automatique (voir fig. 2-22)

Le contrôleur permanent d'isolement et les détecteurs associés à des tores installés sur chaque départ permettent de disposer d'un système de recherche automatique sous tension.



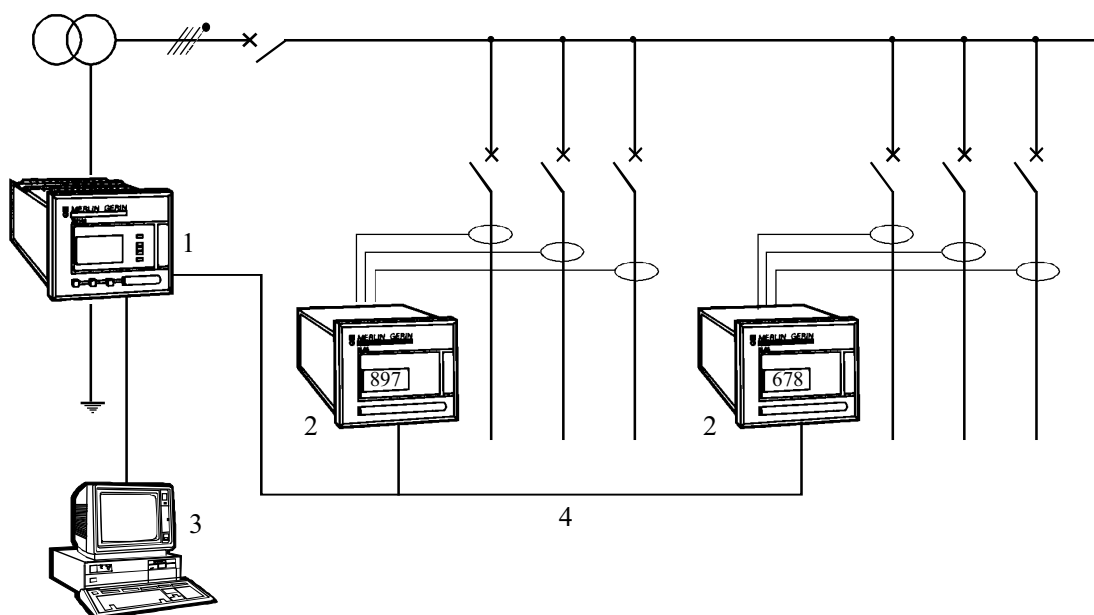
- 1 : générateur fixe *BF*
2 : détecteurs fixes

Figure 2-22 : recherche fixe automatique

□ **exemple 3 : recherche et exploitation automatique** (voir fig. 2-23)

Le contrôleur d'isolement et les détecteurs associés à des tores installés sur chaque départ permettent de suivre l'évolution du niveau d'isolement de chaque circuit.

La Centrale de traitement communique avec un PC qui permet de disposer de la vue d'ensemble du réseau, de son niveau d'isolement et de l'évolution de l'isolement de chaque circuit.



- 1 : générateur fixe *BF* et Centrale de traitement
- 2 : détecteurs
- 3 : PC
- 4 : liaison numérique

Figure 2-23 : recherche et exploitation automatique

■ dispositions particulières

□ utilisation de dispositifs différentiels haute sensibilité (voir fig. 2-24)

Minimum imposé (NF C 15-100, § 532.2.6)

L'utilisation de dispositifs différentiels résiduels haute sensibilité ($\leq 30 \text{ mA}$) est obligatoire dans les cas suivants :

- circuits des socles de prises de courant assigné $\leq 32 \text{ A}$, quel que soit le local
 - circuits de socles de prises de courant dans les locaux mouillés quel que soit leur courant assigné
 - circuits des socles de prises de courant dans les installations temporaires
 - circuits alimentant les salles d'eau et les piscines
 - alimentation des installations de chantiers, des caravanes, des bateaux de plaisance, des installations foraines.
- Cette protection peut être individuelle, par circuit ou par groupe de circuits reliés à la même prise de terre.

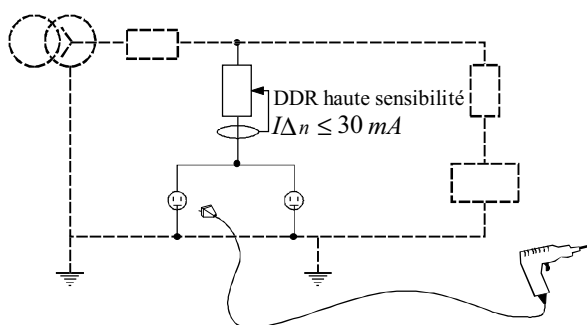


Figure 2-24 : circuit de prises de courant

□ prévention dans les locaux à risques d'incendie (voir fig. 2-25)

Protection différentielle à courant résiduel de sensibilité $\leq 500 \text{ mA}$ obligatoire en tête du local (voir NF C 15-100 § 482.2.10).

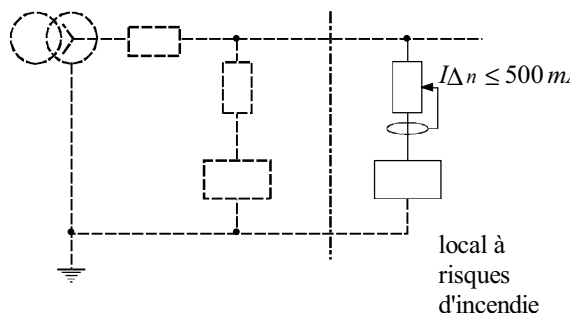


Figure 2-25 : local à risques d'incendie

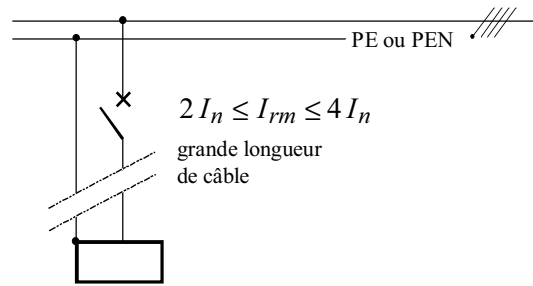
□ cas où l'impédance de boucle est particulièrement élevée

Lorsque les conditions pour assurer le déclenchement des dispositifs de protection contre les défauts entre phases ne peuvent pas être satisfaites, les solutions ci-après peuvent être envisagées.

- **suggestion 1** (voir fig. 2-26)

Installer un appareil à réglage magnétique suffisamment bas pour garantir la relation $I_{cc\ mini} > I_{magnétique}$.

Cette solution permet d'assurer la protection des personnes pour un circuit long. Mais, il faut vérifier que l'appareil ne sera pas sollicité par des courants élevés se développant lors de la mise sous tension des récepteurs (moteurs et autres dispositifs ayant un courant d'appel important).



I_{rm} : seuil de fonctionnement du magnétique

Figure 2-26 : appareil à magnétique bas

- **suggestion 2** (voir fig. 2-27)

Installer une protection différentielle à courant résiduel. La valeur élevée des courants de défaut autorise l'utilisation de basses sensibilités (quelques ampères à quelques dizaines d'ampères).

Cette solution permet de s'affranchir de toute vérification.

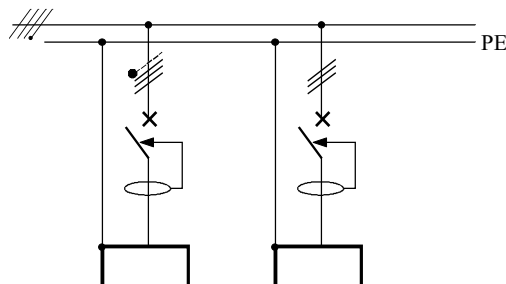


Figure 2-27 : protection différentielle à courant résiduel

• **suggestion 3**

Augmenter la section des conducteurs de protection ou des phases ou des deux simultanément jusqu'à ce que les impératifs de protection des personnes soient atteints. On choisit généralement une section du conducteur de protection égale à la section des phases.

• **suggestion 4** (voir fig. 2-28-a)

Réaliser des liaisons équipotentielles supplémentaires contribuant à la réduction des impédances des boucles de défaut. Leur efficacité doit être vérifiée par des mesures (voir Guide C-15-105 - tableau DC de la norme C-15-100).

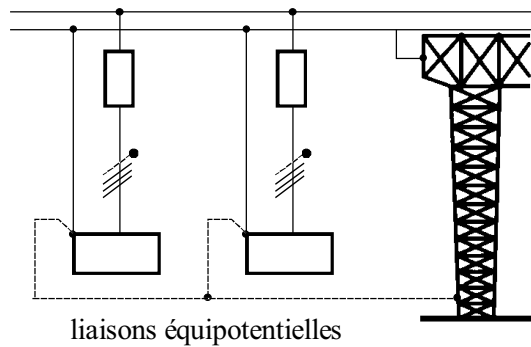


Figure 2-28-a : liaisons équipotentielles supplémentaires

□ **cas particulier où une masse ou un groupe de masses est relié à une prise de terre séparée** (voir fig. 2-28-b)

Protection contre les contacts indirects par dispositif différentiel résiduel (DDR) en tête de chaque groupe de masses relié à une prise de terre séparée. La sensibilité doit être adaptée à la résistance r_{m2} de la prise de terre :

$$I \Delta n \leq \frac{U_L}{r_{m2}}$$

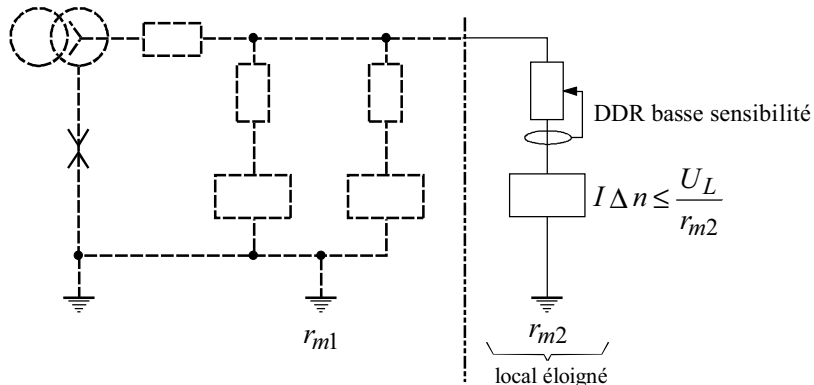


Figure 2-28-b : prise de terre séparée

□ **protection lorsqu'une masse n'est pas reliée à la terre** (voir fig. 2-28-c)

Tolérée seulement pour des locaux ou emplacements secs lorsque la réalisation d'une prise de terre n'est pas possible.

L'utilisation d'un dispositif différentiel résiduel à haute sensibilité ($\leq 30 \text{ mA}$) est obligatoire sur le départ concerné.

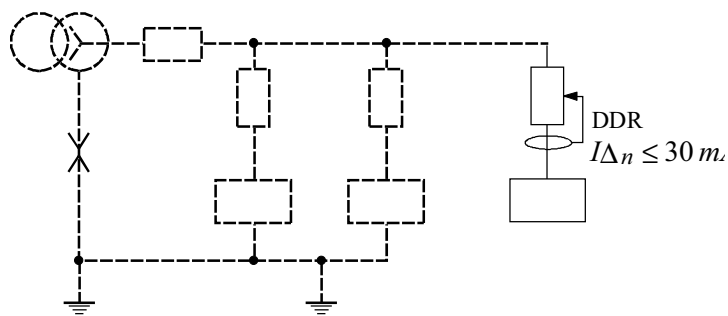
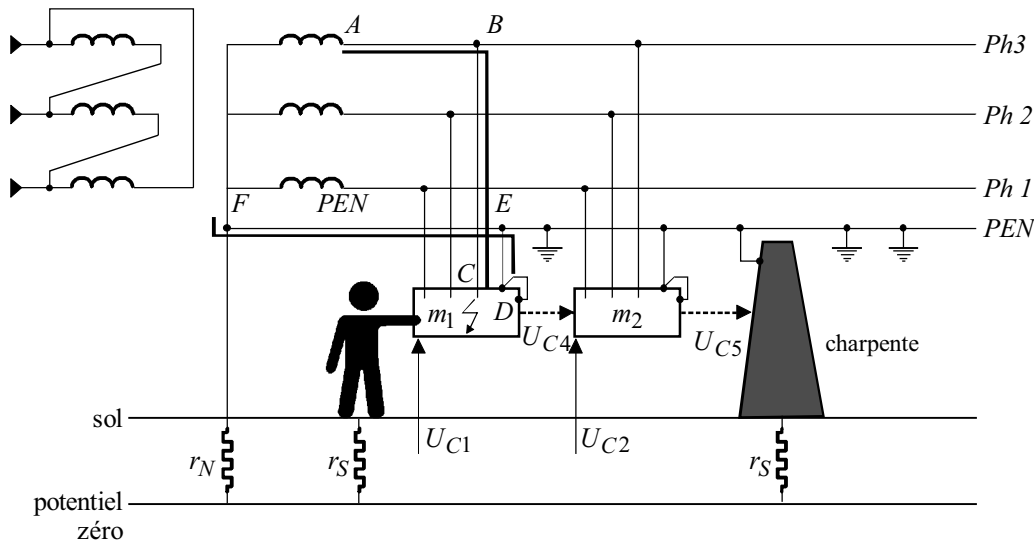


Figure 2-28-c : masse non reliée à la terre

2.5.2. Mise au neutre (schéma TN) (voir fig. 2-29)



- r_N : résistance de la prise de terre du neutre
- r_S : résistance du sol
- U_{C1}, U_{C2} : tensions de contact entre masse et sol
- U_{C4}, U_{C5} : tensions de contact entre deux masses simultanément accessibles
- $ABCDEF$: boucle de défaut

Figure 2-29 : tension de contact lors du premier défaut (schéma TN)

Le principe de la mise au neutre est de transformer tout défaut d'isolement en court-circuit monophasé phase-neutre. Le courant de défaut n'est plus limité que par l'impédance de la boucle de défaut $Z_B = ABCDEF$.

Dans le cas d'un récepteur alimenté par un câble cuivre de 50 mm², de 50 m de long, par exemple, on a, si le conducteur de protection a la même section que les conducteurs de phase, et si on néglige AB et EF :

$$\begin{aligned} Z_{boucle} = Z_{BCDE} &= 2 \times 22,5 \cdot 10^{-3} \times \frac{50}{50} \\ &= 45 \text{ m}\Omega \end{aligned}$$

En prenant un coefficient 0,8 pour tenir compte des liaisons amont AB et EF :

$$V_{BE} = 0,8 \times 230 = 184 \text{ V}$$

on a :
$$I_f = \frac{184}{45 \cdot 10^{-3}} = 4089 \text{ A}$$

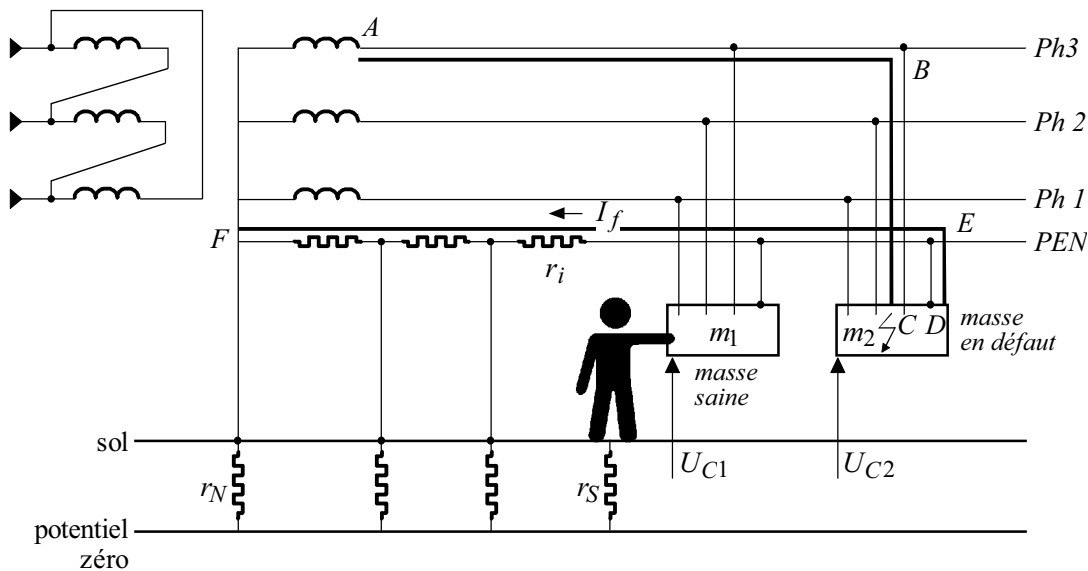
Si on néglige l'impédance du tronçon EF , la masse est alors portée à un potentiel $U_{C1} = Z_{DE} I_f$ par rapport à la terre,

$$Z_{DE} = \frac{Z_{BE}}{2}$$

et
$$U_{C1} = \frac{V_{BE}}{2} = \frac{184}{2} = 92 \text{ V}$$

La tension de contact U_{C4} existant entre deux masses voisines est également égale à $Z_{DE} I_f = 92 \text{ volts}$.

Si le conducteur de protection est régulièrement relié à la terre de manière à créer des zones équipotentielles, les masses saines sont soumises à élévation de potentiel négligeable (voir fig. 2-30).



r_N : résistance de la prise de terre du neutre

r_S : résistance du sol

r_i : résistance de la portion de conducteur de protection reliant une masse saine à la terre

I_f : courant de défaut

$U_C = r_i I_f$: tensions de contact au niveau d'une masse saine

$ABCDEF$: boucle de défaut

Figure 2-30 : tension de contact au niveau d'une masse saine

En effet, dans ces conditions, la tension de contact qui se développe au niveau d'une masse saine est égale à la chute de tension prenant naissance le long de la portion du conducteur de protection qui relie cette masse à la terre. Si des prises de terre existent tout le long du conducteur de protection, la longueur de cette portion est faible devant la longueur de la **boucle de défaut**, si bien que la tension de contact qui apparaît au niveau de la masse saine reste faible.

Un réseau avec mise au neutre (schéma *TN*) est dangereux dès le premier défaut d'isolement ; la coupure de l'alimentation est donc obligatoire dès l'apparition de ce défaut.

Les courants de défaut étant importants, il est admis, comme en *IT* , que la coupure soit assurée par les dispositifs de protection contre les défauts entre phases (disjoncteurs, fusibles). Il est impératif que les conditions de déclenchement de ces dispositifs soient vérifiées. La méthode simplifiée exposée précédemment pour le schéma *IT* peut être appliquée (voir tableau 2-6).

Dans le cas où le fonctionnement de ces dispositifs ne peut pas être obtenu en raison des valeurs élevées des impédances des boucles de défaut, il convient de faire appel à d'autres dispositifs de protection (dispositifs de protection à courant résiduel, par exemple) ou de mettre en place des mesures particulières (voir § 2.5.2.1).

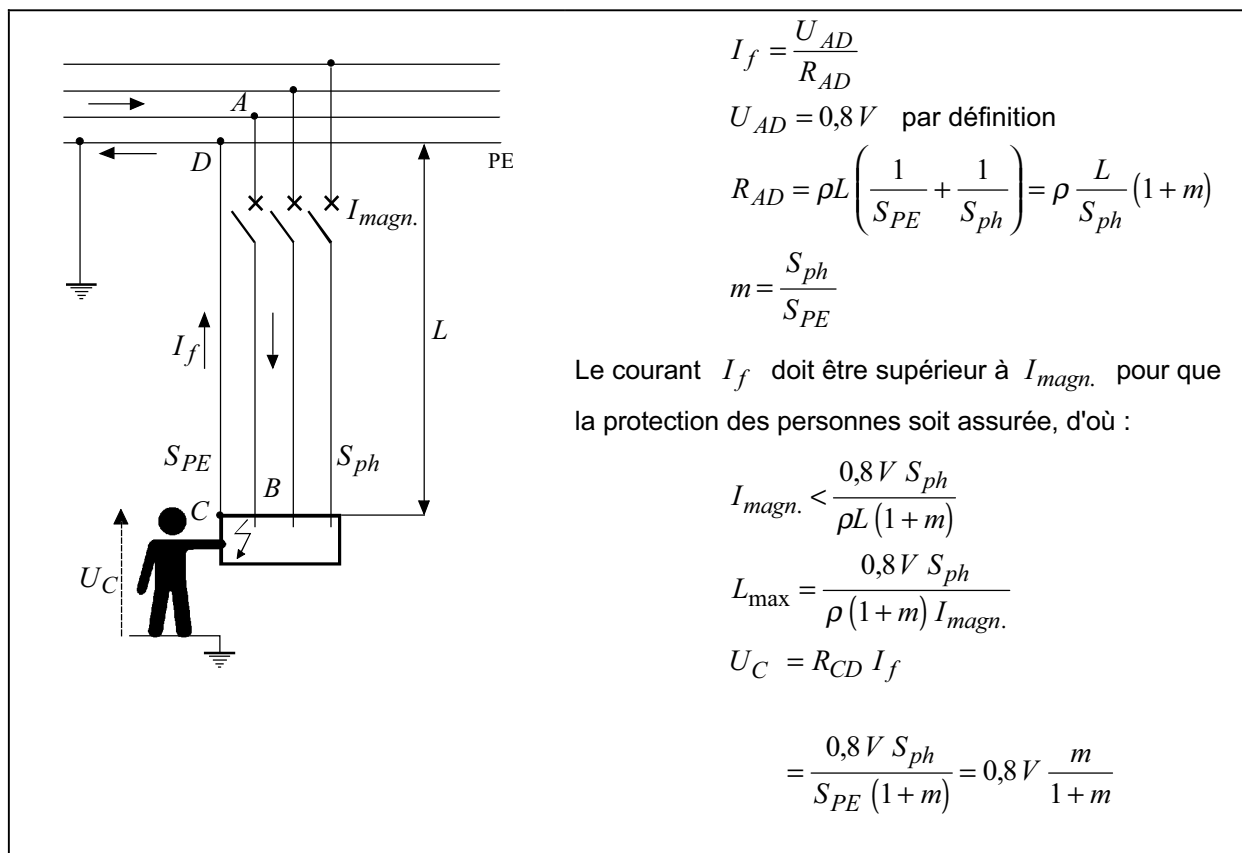


Tableau 2-6 : vérification des conditions de déclenchement en *TN*

Pour vérifier les conditions de déclenchement, on applique la loi d'Ohm au seul départ concerné par le défaut, en faisant les hypothèses suivantes :

- la tension entre la phase en défaut et le *PE* ou *PEN* à l'origine du circuit est prise égale à 80% de la tension simple nominale
- pour les sections < 150 mm², on néglige les réactances des conducteurs devant leur résistance (voir § 2.5.1.)
- le conducteur de protection chemine à côté des conducteurs de phases.

Le calcul montre que la longueur du circuit ne doit pas être supérieure à la valeur donnée par la relation :

$$L_{\max} = \frac{0,8 V S_{ph}}{\rho (1 + m) I_{\text{magn.}} \text{ (ou } I_{\text{fus}} \text{)}}$$

avec :

L_{\max} : longueur maximale en mètres

V : tension simple ($V = 230$ V pour un réseau 230/400 V)

S_{ph} : section des phases en mm²

ρ : résistivité à la température de fonctionnement normal

$$\rho = 27 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m} \quad \text{pour le cuivre} \quad = 1,5 \text{ fois la résistivité à } 20^\circ\text{C}$$

$$\rho = 43 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m} \quad \text{pour l'aluminium} \quad = 1,5 \text{ fois la résistivité à } 20^\circ\text{C}$$

$$m = S_{ph} / S_{PE}$$

S_{PE} : section du conducteur de protection

$I_{\text{magn.}}$, I_{fus} : courants assurant le fonctionnement des dispositifs de protection (disjoncteur ou fusible) en des temps inférieurs aux temps prescrits par les tableaux 2-3.

Tension nominale U_0 (V_{CA})	Temps de coupure (s)
120 - 127	0,8
220 - 230	0,4
380 - 400	0,2
> 400	0,1

Tableau 2-7 : schéma TN - temps de coupure maximale CEI-364 NFC 15-100 § 413-1-3.3

$I_{\text{magn.}}$ et I_{fus} sont les courants assurant le fonctionnement des dispositifs de protection en des temps inférieurs aux temps correspondant à la tension de contact qui se développe au niveau du récepteur en défaut. Comme pour le schéma IT la norme CEI 364 et la C 15-100 admettent de ne pas tenir compte de la tension de contact présumée apparaissant lors du défaut et fixe des temps de coupure constants dépendant de la tension nominale du réseau (voir tableau 2-7).

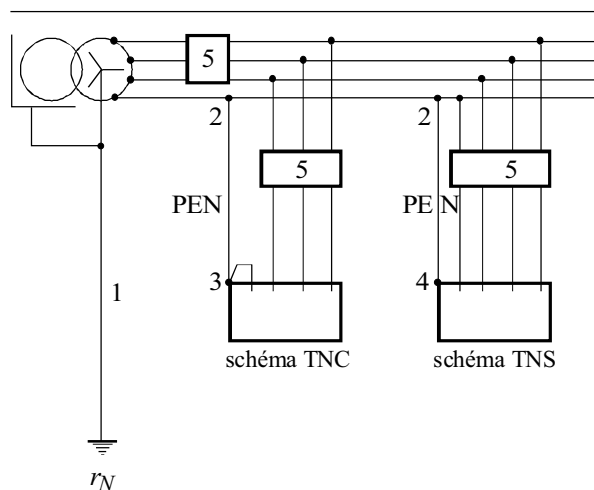
Publication, traduction et reproduction totales ou partielles de ce document sont rigoureusement interdites sauf autorisation écrite de nos services.
The publication, translation and reproduction, either wholly or partly, of this document are not allowed without our written consent.

2.5.2.1. Mise en oeuvre du schéma TN

■ dispositions générales

Elles sont énumérées ci-dessous et représentées sur la figure 2-31 :

- relier régulièrement à la terre le conducteur *PE* de protection
- faire cheminer les conducteurs de protection *PE* ou *PEN* à côté des conducteurs de phases sans interposer d'élément ferromagnétique ou utiliser des câbles incorporant les conducteurs de phase et le conducteur de protection
- raccorder le conducteur *PEN* sur la borne "masse" du récepteur
- séparation du conducteur neutre et du conducteur de protection lorsque la section est $\leq 6 \text{ mm}^2$ cuivre ou 10 mm^2 alu ou en présence de canalisations mobiles
- déclenchement au premier défaut d'isolement au moyen des dispositifs de protection classique (disjoncteur ou fusible)
- vérification des conditions de déclenchement des dispositifs de protection. Cette vérification doit être faite à la conception de l'installation par calcul et à la mise en service par des mesures.



Nota : le conducteur *PEN* ne doit être ni coupé, ni comporter d'appareillage. Les appareils de protection sont donc :

- tripolaires lorsque le circuit comporte un conducteur *PEN* (schéma *TNC*)
- tétrapolaires ($3P + N$) lorsque le circuit comporte un conducteur neutre et un conducteur *PE* (schéma *TNS*).

- 1 : mise à terre directe du point neutre
- 2 : conducteur de protection *PE* ou *PEN*
- 3–4 : raccordement des masses au conducteur de protection
- 5 : dispositif de protection contre les défauts entre phases

Figure 2-31 : mise en oeuvre du schéma TN

■ dispositions particulières

□ **dispositif différentiel haute sensibilité** (voir fig. 2-32)

Minimum imposé (NF C 15-100, § 532.2.6)

L'utilisation de dispositifs différentiels résiduels (DDR) à haute sensibilité ($\leq 30 \text{ mA}$) est obligatoire dans les cas suivants :

- circuits des socles de prises de courant assigné $\leq 32 \text{ A}$, quel que soit le local
- circuits des prises de courant dans les locaux mouillés quels que soient leurs courants assignés
- circuits des prises de courant dans les installations temporaires
- circuits alimentant les salles d'eau et les piscines
- alimentation des installations de chantiers, des caravanes, des bateaux de plaisance, des installations foraines.

Cette protection peut être individuelle, par circuit ou par groupe de circuits.

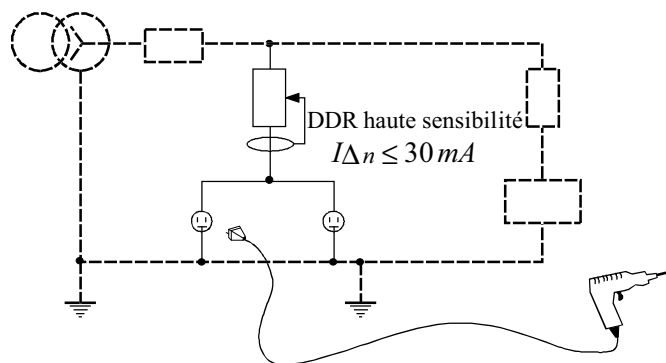


Figure 2-32 : circuit de prises de courant

□ **cas particulier où une masse ou un groupe de masses est relié à une prise de terre séparée** (voir fig. 2-33)

Protection contre les contacts indirects par dispositifs différentiels résiduels (DDR) en tête de chaque groupe de masses relié à une prise de terre séparée. La sensibilité doit être adaptée à la résistance r_{m2} de la prise de terre $I \Delta n \leq \frac{U_L}{r_{m2}}$

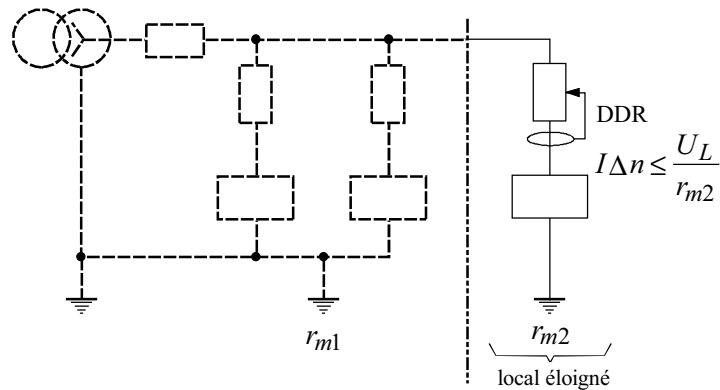


Figure 2-33 : prise de terre séparée

□ **prévention dans les locaux à risques d'incendie** (voir fig. 2-34)

Dans les locaux à risques d'incendie, le schéma $TN - C$ est interdit, le schéma $TN - S$ devient obligatoire ; l'utilisation de dispositifs différentiels résiduels de sensibilité $\leq 500 \text{ mA}$ est obligatoire pour la protection des circuits (cf. NF C 15-100 § 482.2.10).

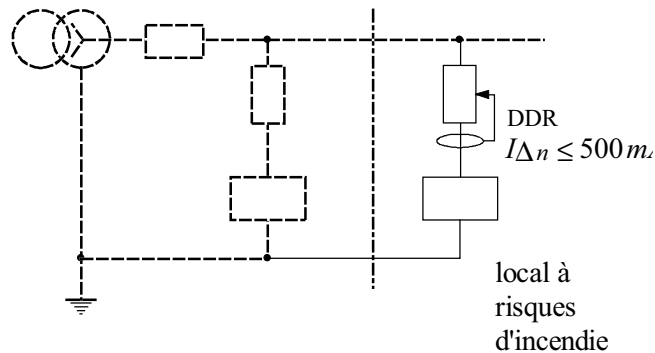


Figure 2-34 : local à risques d'incendie

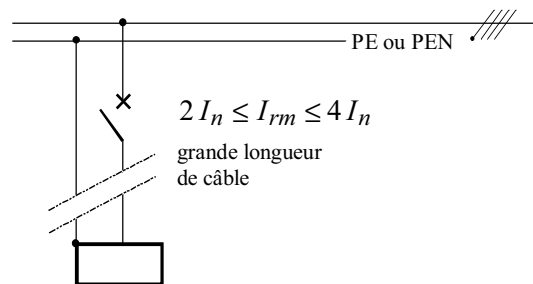
□ cas où l'impédance de boucle est particulièrement élevée

Lorsque le déclenchement des dispositifs de protection contre les surintensités ne peut pas être satisfait, les solutions ci-après peuvent être envisagées.

- **suggestion 1** (voir fig. 2-35)

Installer un appareil à réglage magnétique bas.

Cette solution permet d'assurer la protection des personnes pour un circuit dont l'impédance de la boucle de défaut est élevée. Mais, il faut vérifier que l'appareil ne sera pas sollicité par des courants élevés à la mise sous tension du ou des récepteurs.



I_{rm} : seuil de fonctionnement du magnétique

Figure 2-35 : appareil à magnétique bas

- **suggestion 2** (voir fig. 2-36)

Installer un dispositif à courant différentiel résiduel. La valeur élevée des courants de défaut autorise l'utilisation de basses sensibilités (quelques ampères à quelques dizaines d'ampères).

Cette solution permet de s'affranchir de toute vérification.

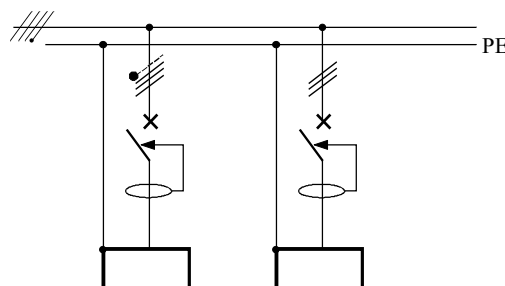


Figure 2-36 : protection différentielle à courant résiduel

- **suggestion 3**

Augmenter la section des conducteurs de protection (*PE* ou *PEN*) ou des phases ou des deux simultanément jusqu'à ce que les impératifs de protection des personnes soient atteints.

- **suggestion 4** (voir fig. 2-37-a)

Réaliser des liaisons équipotentielle supplémentaires contribuant à la réduction des impédances des boucles de défaut. Leur efficacité doit être vérifiée par des mesures (voir Guide C-15-105 - tableau DC de la norme C 15-100).

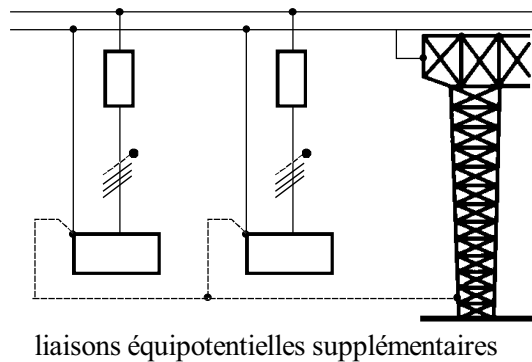


Figure 2-37-a : liaisons équipotentielles supplémentaires

□ **protection lorsqu'une masse n'est pas reliée à la terre** (voir fig. 2-37-b)

Tolérée seulement pour des locaux ou emplacements secs lorsque la réalisation d'une prise de terre n'est pas possible.

L'utilisation d'un dispositif différentiel résiduel à haute sensibilité (≤ 30 mA) est obligatoire sur le départ concerné.

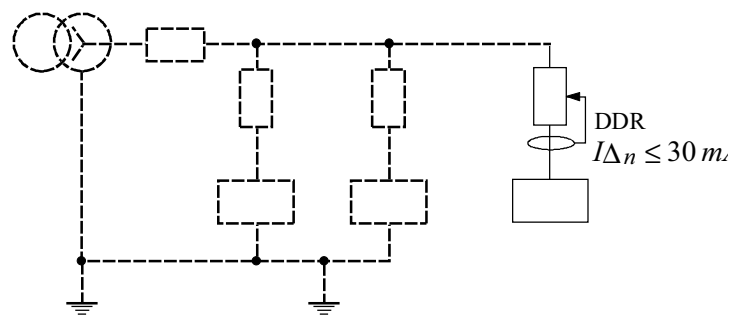
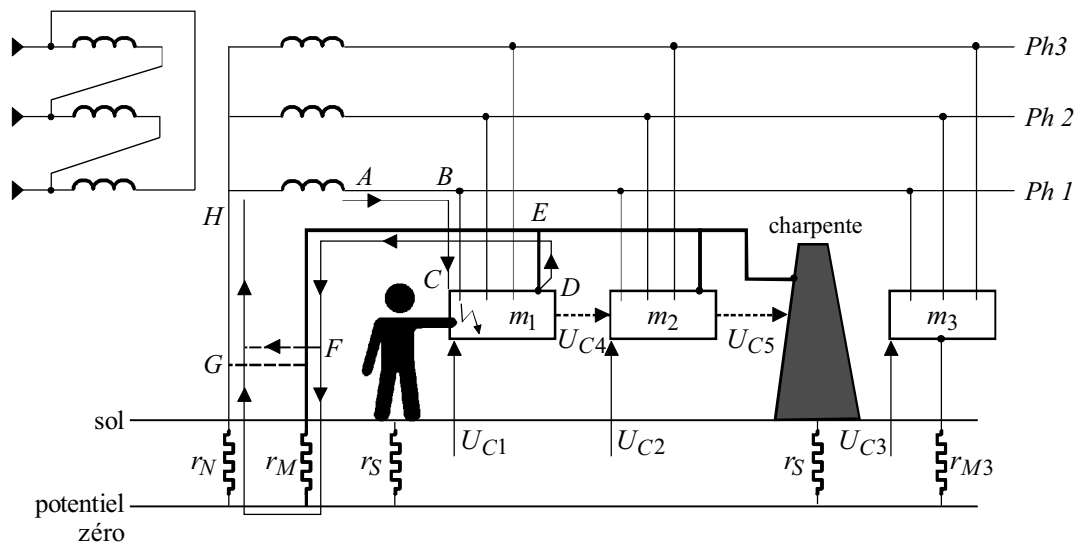


Figure 2-37-b : masse non reliée à la terre

2.5.3. Neutre mis à la terre (schéma TT) (voir fig. 2-38)



- r_N : résistance de la prise de terre du neutre
- r_M : résistance de la prise de terre des masses
- r_S : résistance du sol
- r_{M3} : résistance de la prise de terre d'une masse éloignée non interconnectée
- I_f : courant de défaut
- U_{C1}, U_{C2}, U_{C3} : tensions de contact en masse et sol
- U_{C4}, U_{C5} : tension de contact entre deux masses simultanément accessibles
- $ABCDEFGH$: boucle de défaut

Figure 2-38 : tension de contact lors du premier défaut d'isolement (schéma TT)

En présence d'un défaut d'isolement, il se développe un courant de défaut I_f qui, si la prise de terre des masses et la prise de terre du neutre ne sont pas interconnectées, est essentiellement limité par les résistances de ces prises de terre :

$$I_f = \frac{V}{r_N + r_M}$$

V étant la tension simple du réseau.

Si $r_N = 10 \Omega$ et $r_M = 15 \Omega$ par exemple, on a :

$$I_f = \frac{230}{25} = 9,2 \text{ A}$$

Les masses interconnectées sont alors portées à un potentiel U_{C1} :

$$U_{C1} = r_M I_f = 15 \times 9,2 = 138 \text{ V}$$

potentiel dangereux imposant la coupure de l'alimentation.

La tension apparaissant entre deux masses voisines m_1 et m_2 est égale à :

$$U_{C4} \cong Z_{DE} I_f$$

Z_{DE} étant l'impédance du tronçon DE ; si ce tronçon est constitué par un câble cuivre de 50 mm² et de 50 m de long, on a :

$$Z_{DE} = 22,5 \times 10^{-3} \Omega$$

et $U_{C4} = 22,5 \times 9,2 \times 10^{-3}$, soit 0,21 V , potentiel inoffensif.

Une masse m_3 non interconnectée avec les autres ne subit aucune élévation de potentiel.

Si les prises de terre du neutre et des masses se trouvent reliées de fait par des conducteurs enterrés à fond de fouilles par exemple, le courant de défaut ne se referme plus par la terre, et n'est plus limité en pratique que par l'impédance de la boucle de défaut $ABCDEFGH$.

Sa valeur peut être élevée et les masses portées à un potentiel dangereux. Pour une impédance de boucle Z_B de 100 mΩ, on a un courant de défaut de 2 200 A.

Et si $Z_{DF} \cong Z_B / 2$ par exemple, la masse m_1 est portée à un potentiel de 110 volts. Si $Z_{DE} \cong Z_{DF} / 2$, la tension apparaissant entre les masses m_1 et m_2 est égale à 55 volts.

Les tensions de contact apparaissant lors d'un premier défaut d'isolement dans un réseau à neutre mis directement à la terre (schéma TT) sont dangereuses. Le déclenchement au premier défaut est donc obligatoire. Par ailleurs, si la prise de terre du neutre et celles des masses ne sont pas interconnectées, les courants de défaut sont faibles et ne sont pas détectés par les dispositifs de protection contre les défauts entre phases (disjoncteur ou fusible). La coupure doit alors être obtenue par des dispositifs de protection à courant différentiel résiduel (DDR) . Lorsque les prises de terre du neutre et des masses sont interconnectées ou confondues, les courants de défaut sont beaucoup plus élevés.

Cependant comme aucune disposition n'est exigée dans ce régime pour minimiser, calculer, mesurer les impédances des boucles de défaut, rien ne permet d'affirmer que les dispositifs de protection contre les défauts entre phases peuvent fonctionner, l'installation reste du type *TT* et la mise en place de dispositifs à courant différentiel résiduel demeure obligatoire (voir fig. 2-39).

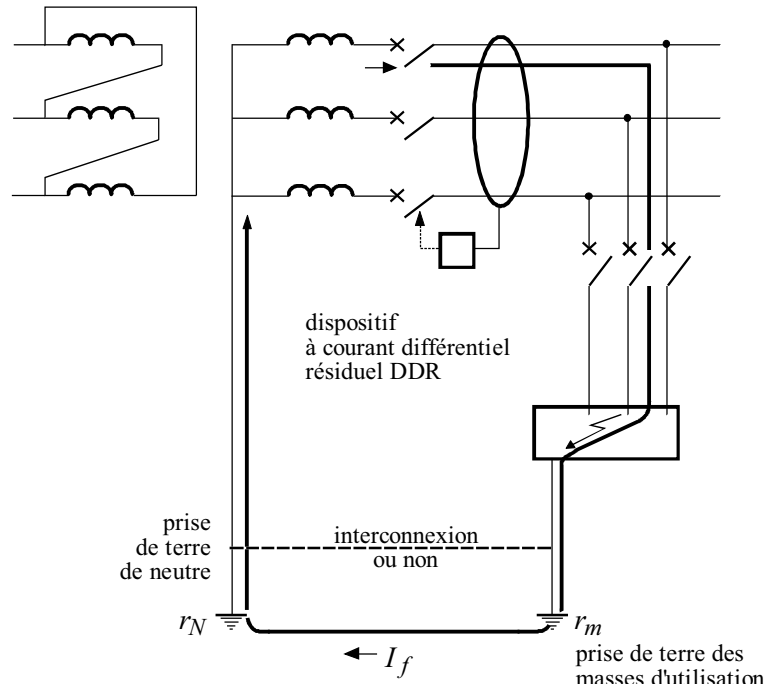


Figure 2-39 : protection par dispositif différentiel (schéma TT)

2.5.3.1. Mise en oeuvre du schéma TT

■ dispositions générales

Les masses sont interconnectées et reliées à la terre soit toutes ensemble soit par groupes, soit individuellement.

La protection contre les contacts indirects est assurée par des DDR dont la sensibilité $I \Delta n$ respecte la condition :

$$I \Delta n \leq \frac{50 V}{r_m} \quad (1)$$

(1) 25 V dans les locaux humides, les installations de chantiers et les établissements agricoles.

Le choix de la sensibilité du DDR, fonction de la résistance de la prise de terre, est donné par le tableau 2-8.

$I \Delta n$	Résistance maximale de la prise de terre	
	$U_L = 50 V$	$U_L = 25 V$
3 A	16 Ω	8 Ω
1 A	50 Ω	25 Ω
500 mA	100 Ω	50 Ω
300 mA	166 Ω	83 Ω
30 mA	1 660 Ω	833 Ω

Tableau 2-8 : limite supérieure de la résistance de la prise de terre des masses à ne pas dépasser en fonction de la sensibilité des DDR et de la tension limite U_L

■ dispositions particulières

□ dispositions pour assurer la sélectivité

Afin de permettre la sélectivité, la norme C15-100, article 536-3 admet que le fonctionnement du dispositif différentiel placé en tête de l'installation puisse être retardé d'un temps au plus égal à 1 s. On peut ainsi, pour les défauts à la terre aisément réaliser une sélectivité totale sur plusieurs niveaux comme le montre la figure 2-40.

Sélectivité totale à 4 niveaux

Protection :

- en A : DDR retardé
- en B : DDR retardé
- en C : DDR retardé
- en D : DDR instantané

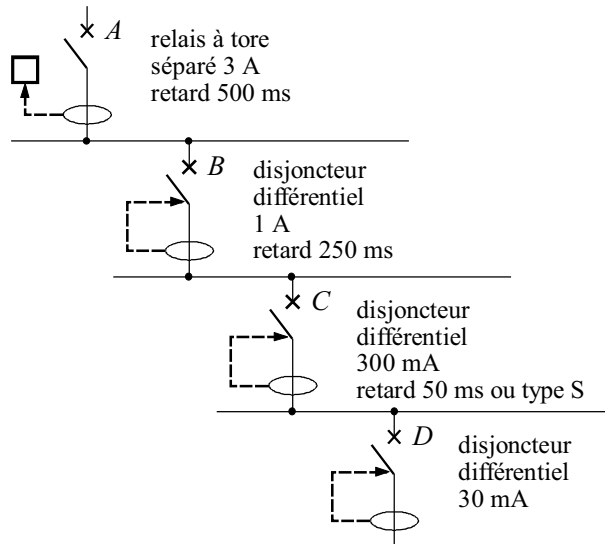


Figure 2-40 : sélectivité totale à 4 niveaux

□ cas où une masse ou un groupe de masses est relié à une prise de terre séparée (voir fig. 2-41)

Protection contre les contacts indirects par DDR en tête de chaque groupe de masses relié à une prise de terre distincte. La sensibilité doit être adaptée à la résistance r_{m2} de la prise de terre.

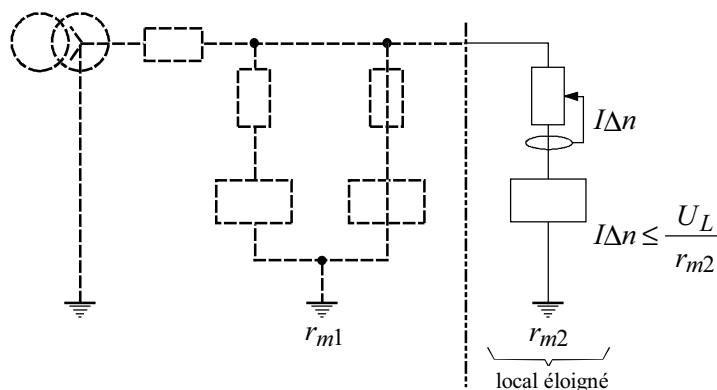


Figure 2-41 : prise de terre séparée

□ **dispositif différentiel haute sensibilité** (voir fig. 2-42)

Minimum imposé (NF C 15-100, § 532.2.6)

L'utilisation de dispositifs différentiels résiduels à haute sensibilité ($\leq 30 \text{ mA}$) est obligatoire dans les cas suivants :

- circuits des socles de prises de courant assigné $\leq 32 \text{ A}$, quel que soit le local
 - circuits de socles de prises de courant dans les locaux mouillés quel que soit leur courant assigné dans les conditions indiquées ci-dessus
 - circuits de socles de prises de courant dans les installations temporaires
 - circuits alimentant les salles d'eau et les piscines
 - alimentation des installations de chantiers, des caravanes, des bateaux de plaisance, des installations foraines.
- Cette protection peut être individuelle, par circuit ou par un groupe de circuits.

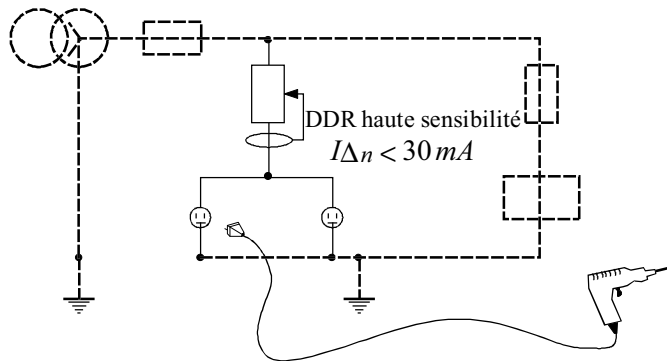


Figure 2-42 : circuit de prises de courant

□ **prévention dans les locaux à risques d'incendie** (voir fig. 2-43)

Protection différentielle à courant résiduel obligatoire de sensibilité $\leq 500 \text{ mA}$ pour la protection des circuits (cf. NF C 15-100 § 482.2.10).

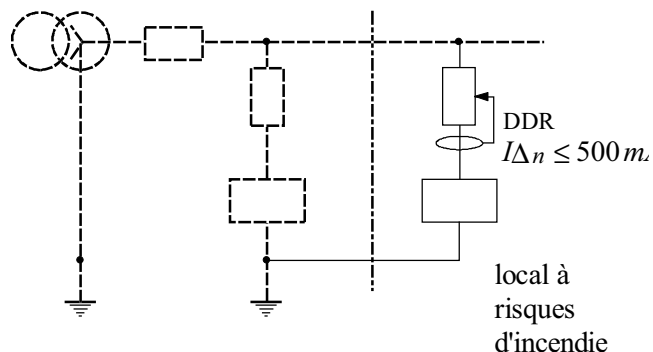


Figure 2-43 : local à risques d'incendie

□ **protection lorsqu'une masse n'est pas reliée à la terre** (voir fig. 2-44)

Tolérée seulement pour des locaux ou emplacements secs lorsque la réalisation d'une prise de terre n'est pas possible.

L'utilisation d'un dispositif différentiel résiduel à haute sensibilité ($\leq 30 \text{ mA}$) est obligatoire sur le départ concerné.

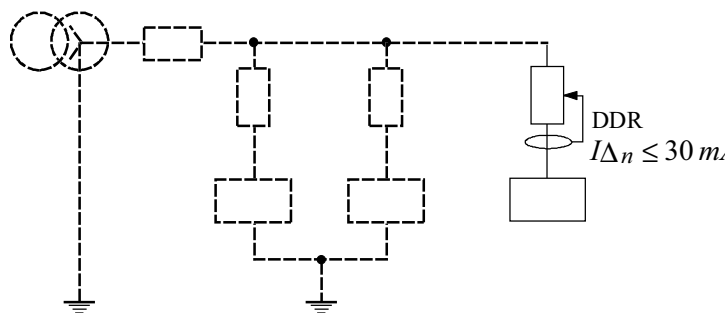


Figure 2-44 : masse non reliée à la terre

2.6.2. Particularités de mise en oeuvre des *DDR*

Divers phénomènes peuvent perturber le fonctionnement des dispositifs différentiels résiduels et ainsi provoquer des déclenchements intempestifs. Ces phénomènes sont exposés ci-dessous.

2.6.2.1. Courants de fuite permanents

Toute installation électrique *BT* possède un courant de fuite à la terre, dû, pour une part importante, à la capacité phase-terre des conducteurs. Il est d'autant plus élevé que le réseau est étendu. Il est majoré par les capacités incorporées aux filtres de certains récepteurs électroniques (bureautique, informatique, etc...). Le courant de fuite permanent peut être évalué sur la base suivante :

- canalisations mono ou triphasées : 1,5 mA/100 m
- filtres mono ou triphasés : de l'ordre de 3 mA/récepteur
- planchers chauffants : 1 mA/kW.

Ces courants peuvent provoquer le fonctionnement intempestif des dispositifs différentiels résiduels ayant un haut niveau de sensibilité.

2.6.2.2. Courants de fuite transitoires

La mise sous tension des capacités mentionnées précédemment génère des courants d'appel transitoires très courts qui peuvent être modélisés par une onde oscillatoire de courant $0,5 \mu\text{s} / 100 \text{ kHz}$ (voir fig. 2-46). Des amplitudes supérieures à 10 A avec un front de montée de l'ordre de $1 \mu\text{s}$ ont pu être constatées à la mise sous tension.

L'apparition d'un premier défaut d'isolement est à l'origine de courants transitoires qui correspondent au changement brutal de la tension appliquée aux capacités de l'installation. On assiste à la décharge de la capacité de la phase en défaut et à la charge des capacités des phases saines.

Ces courants, par nature déséquilibrés, peuvent entraîner le fonctionnement intempestif de dispositifs différentiels résiduels.

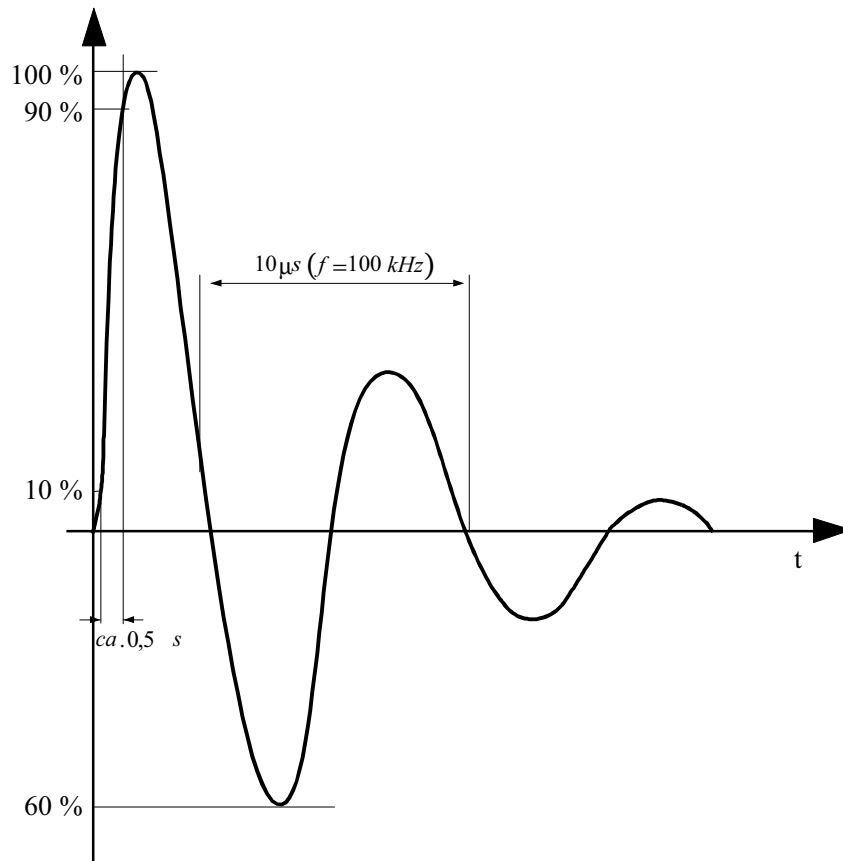


Figure 2-46 : onde de courant normalisée $0,5 \mu\text{s}/100 \text{ kHz}$

2.6.2.3. Influence des surtensions

Les réseaux électriques sont le siège de surtensions d'origine atmosphériques ou dues au fonctionnement des dispositifs de protection (coupures de charges inductives par exemple).

Leur observation a établi que leur niveau, en basse tension, demeure en général inférieur à 6 kV et qu'elles peuvent être représentées par l'onde conventionnelle 1,2 / 50 μ s (voir fig. 2-47).

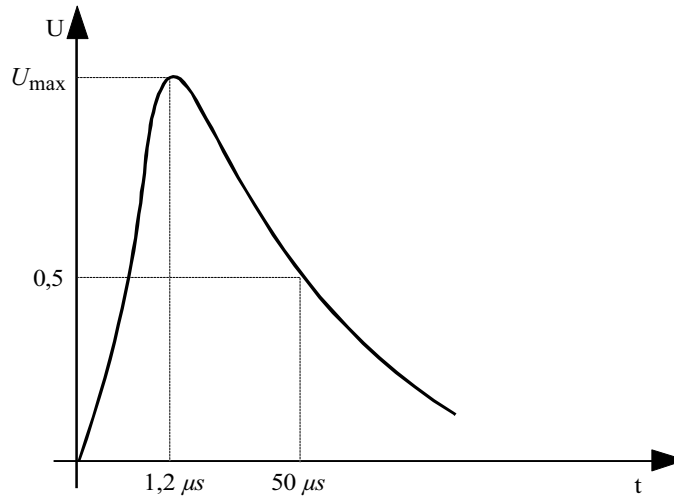


Figure 2-47 : surtension normalisé 1,2/50 μ s

Ces surtensions sont à l'origine de courants représentés par l'onde conventionnelle 8 / 20 μ s de valeur crête de plusieurs dizaines d'ampères (voir fig. 2-48).

Ils s'écoulent à la terre par les capacités de l'installation, les parafoudres ou par claquage des points faibles de l'installation et peuvent provoquer le fonctionnement des dispositifs différentiels.

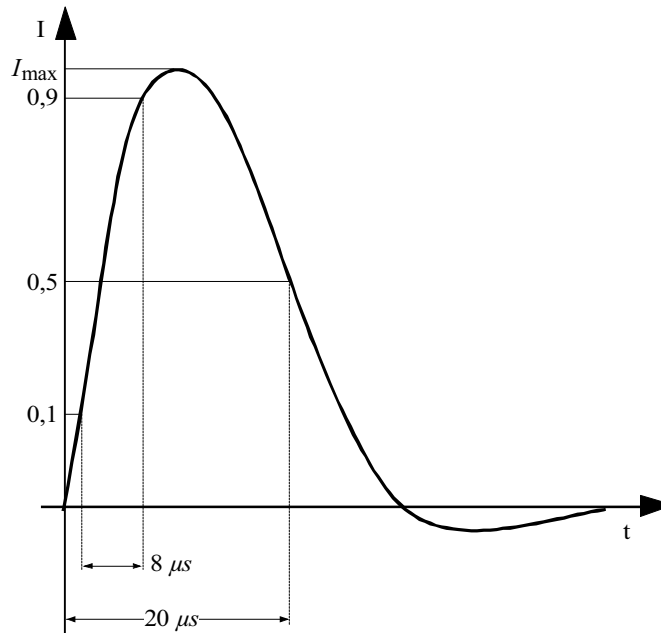


Figure 2-48 : onde de courant normalisée 8/20 μ s

2.6.2.4. Remèdes

Les fuites capacitives et courants transitoires mentionnés ci-dessus ainsi que les commutations (bobines de contacteurs, relais, etc...), les décharges électrostatiques et les ondes électromagnétiques rayonnées, génèrent des courants différentiels qui peuvent provoquer le fonctionnement des dispositifs résiduels sensibles.

Il est nécessaire que ceux-ci aient un niveau d'immunité suffisant à cet égard (voir fig. 2-49).

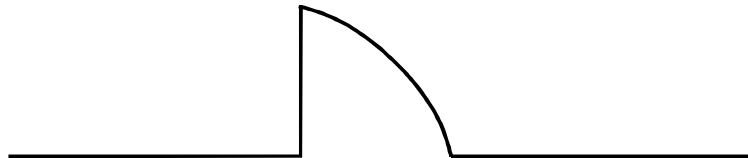


Figure 2-49 : sigle d'immunité aux déclenchements indésirables normalisé (NF C 62-411)

Tout *DDR* installé doit avoir un niveau d'immunité minimal, le symbole de la NF C 62-411 représenté par la figure 2-49 garanti un comportement correcte du dispositif en présence des perturbations définies par le tableau 2-9.

Les courants de fuite permanents, en aval d'un *DDR*, doivent faire l'objet d'une évaluation, en particulier dans le cas de réseaux étendus, en présence de matériels avec filtres ou en schéma *IT*.

La NF C 15-100 recommande que le niveau de ces courants de fuite, en aval d'un *DDR*, ne dépasse pas $0,5 I \Delta n$.

En pratique, la limitation du courant de fuite permanent à $0,25 I \Delta n$, par subdivision des circuits, élimine, en pratique, l'influence de tous les courants transitoires correspondants.

Perturbation	Type d'essai	Tenue requise
Surtension	onde de tension 1,2 / 50 μs	6 kV
Courant transitoire	onde de courant 0,5 μs / 100 kHz onde de courant 8 / 20 μs	200 A 200 A 60 A pour les 10 mA 5 kA pour les types S ou à retard intentionnel
Commutation	transitoires rapides en rafales CEI 801-4	4 kV
Décharges électro-statiques	décharges électrostatiques CEI 801-2	8 kV
Ondes radioélectriques	champs électromagnétiques rayonnés CEI 801-3	3 V/m

Tableau 2-9 : niveaux de tenue aux tests de compatibilité électromagnétique requis pour les DDR

2.6.2.5 Composantes continues

L'alimentation de puissance de certains appareils comportent des dispositifs redresseurs (diodes, thyristors, triacs, etc...).

En cas de défaut d'isolement en aval de ces dispositifs, le courant de fuite à la terre, mesuré en amont de ces équipements, comporte, dans certains cas, une composante continue, qui peut provoquer la saturation du circuit magnétique des DDR et perturber leur fonctionnement. Il convient dans ce cas d'employer des DDR adaptés à la situation.

Pour résoudre ce problème, la Commission Electronique Internationale (CEI) a classé les dispositifs différentiels en trois types selon leur aptitude à fonctionner lorsque le courant de défaut présente une composante continue :

- DDR classe AC : différentiel sensible à un courant résiduel alternatif pur
- DDR classe A : différentiel sensible à un courant résiduel pulsé
- DDR classe B : différentiel sensible à un courant résiduel continu pur.

2.6.2.6. Recommandations d'installation des *DDR* à tore séparé

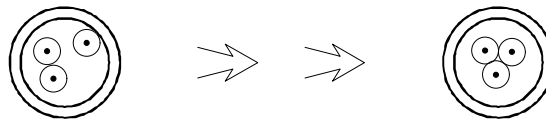
Le capteur étant un tore magnétique, un courant d'appel important tel que le courant de démarrage d'un moteur peut le saturer localement et être à l'origine de déclenchements indésirables.

L'installation sans précaution particulière, d'un dispositif à tore séparé, ne permet pas un réglage de $I \Delta n$ inférieur au 1/1 000^e du courant max. phase :

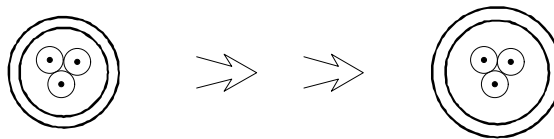
$$I \Delta n \geq \frac{I_{phase \max.}}{1\,000}, \frac{I \Delta n}{I_{phase \max.}} \geq \frac{1}{1\,000}$$

Cette limite peut être sensiblement abaissée en prenant les mesures ci-dessous, illustrées par la fig. 2-50-a et décrite dans le tableau 2-10 :

- centrer les câbles dans le tore



- prendre 1 tore plus grand que nécessaire



- mettre un manchon magnétique pour canaliser le flux

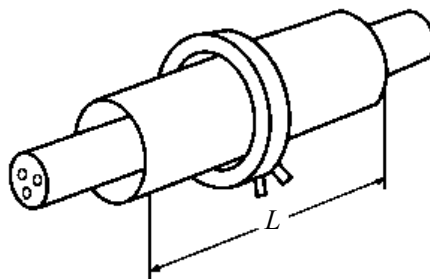


Figure 2-50-a : moyens pour améliorer les performances d'un *DDR* utilisé avec tore séparé

Mesures		Gain	
Centrage soigné des câbles dans le tore		3	
Surdimensionnement du tore	$\phi 50^{(1)} \rightarrow \phi 100^{(2)}$	2	
	$\phi 80 \rightarrow \phi 200$	2	
	$\phi 120 \rightarrow \phi 200$	6	
Utilisation d'un manchon en acier ou fer doux	$\phi 50$	4	
	. d'épaisseur 0,5 mm	$\phi 80$	3
	. de longueur équivalente au diamètre du tore	$\phi 120$	3
	. entourant complètement le câble avec recouvrement des extrémités	$\phi 200$	2
(1) diamètre suffisant pour le câble considéré			
(2) diamètre utilisé			

Tableau 2-10 : moyens pour diminuer le rapport $I_{\Delta n} / I_{phase\ max.}$

2.6.2.7. Recommandations d'emploi des dispositifs différentiels résiduels (DDR) à haute sensibilité

■ déséquilibre des courants capacitifs (voir fig. 2-50-b)

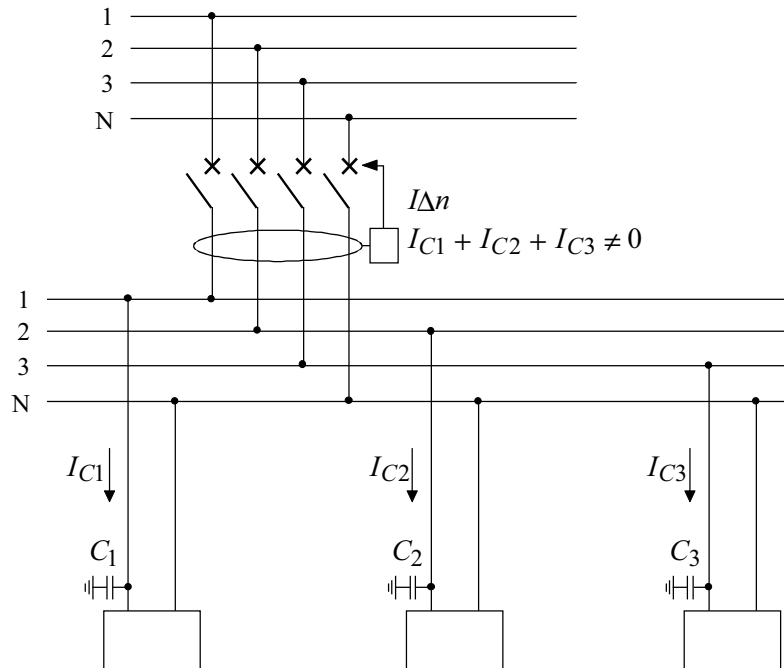
Les charges et les canalisations monophasées entraînent naturellement des déséquilibres des courants capacitifs qui peuvent provoquer le fonctionnement des dispositifs différentiels à haute sensibilité ($I_{\Delta n} \leq 30 \text{ mA}$).

On remédie au problème en subdivisant les circuits placés en aval d'un DDR haute sensibilité de manière à réduire le déséquilibre et ainsi éviter les déclenchements intempestifs.

On retiendra que le déséquilibre des courants capacitifs des circuits placés en aval d'un DDR ne doit pas dépasser la moitié du courant de réglage du DDR.

Par exemple :

$$I_{\text{déséquilibre}} \leq 15 \text{ mA pour } I_{\Delta n} = 30 \text{ mA}$$



$$C_1 \neq C_2 \neq C_3$$

$$I_{C1} \neq I_{C2} \neq I_{C3}$$

$$I_r = I_{C1} + I_{C2} + I_{C3} \neq 0$$

$$I_r \leq \frac{I_{\Delta n}}{2}$$

Figure 2-50-b : déséquilibre des courants capacitifs

■ **déclenchement par sympathie** (voir fig. 2-50-c et 2-50-d)

Lors d'un défaut d'isolement le courant capacitif se répartit dans les départs sains et peut ainsi provoquer le déclenchement des dispositifs différentiels installés sur ces départs.

La solution consiste à limiter la longueur des canalisations et le nombre de récepteurs placés en aval d'un dispositif différentiel haute sensibilité.

On retiendra que le courant capacitif d'un départ ne doit pas dépasser le quart du seuil de réglage du DDR qui assure sa protection.

$$I_C \leq \frac{I\Delta n}{4}, \quad \text{d'où} \quad I\Delta n \geq 4 I_C$$

Cette règle permet de tenir compte des courants capacitifs transitoires se développant lors de la mise sous tension des récepteurs et lors d'un défaut d'isolement, elle permet également de résoudre le problème posé par les déséquilibres des courants capacitifs.

Les valeurs des courants capacitifs se refermant par un départ sain peuvent être évaluées au moyen des expressions suivantes :

- schéma *IT* triphasé sans neutre $I_C = 3 C \omega V$
- schéma *IT* triphasé + neutre $I_C = 4 C \omega V$
- schéma *IT* monophasé $I_C = 2,5 C \omega V \text{ maxi}$
- schéma *TT* triphasé sans neutre $I_C = 3 C \omega V$
- schéma *TT* triphasé + neutre $I_C = 4 C \omega V \text{ maxi}$
- schéma *TT* monophasé $I_C = C \omega V \text{ maxi}$
- schéma *TN* triphasé sans neutre $I_C \cong C \omega V$
- schéma *TN* triphasé + neutre $I_C = C \omega V$
- schéma *TN* monophasé $I_C = C \omega V$

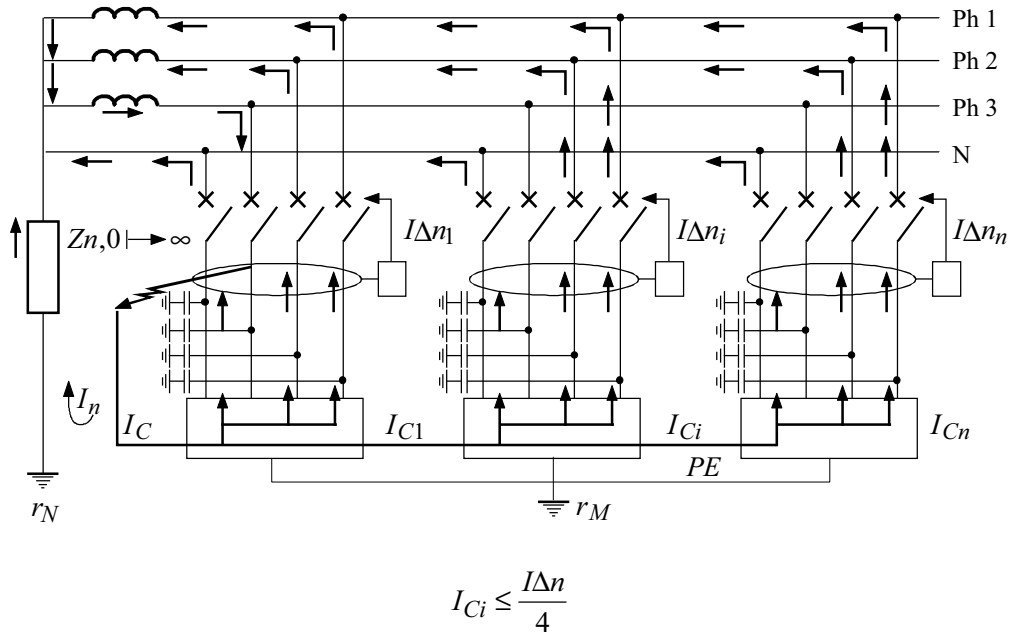


Figure 2-50-c : réseau triphasé - déclenchement par sympathie

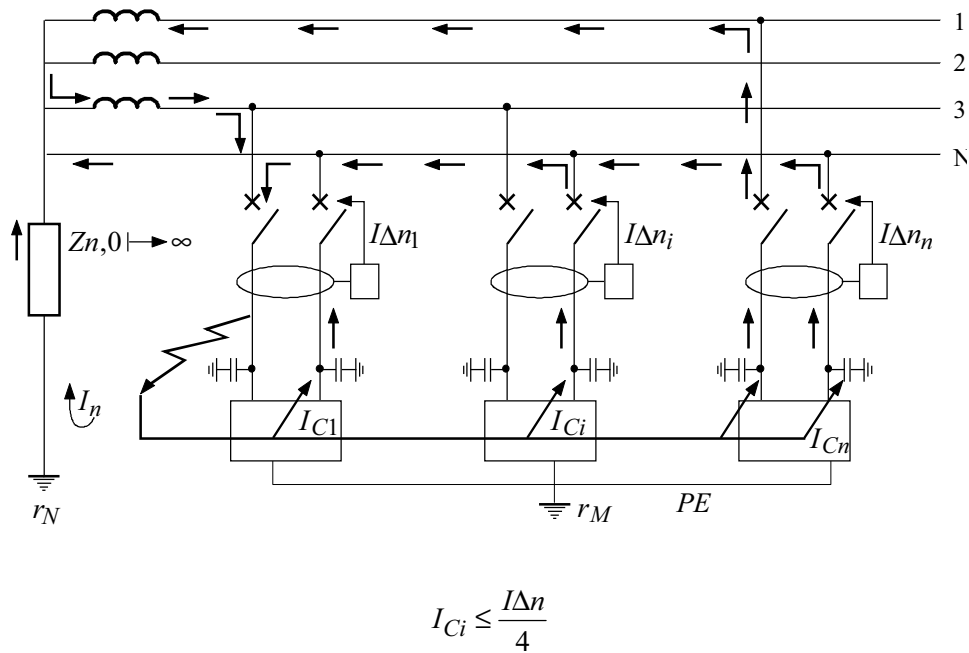


Figure 2-50-d : réseau monophasé - déclenchement par sympathie

2.7. Dimensionnement protection et coupure du conducteur neutre

2.7.1. Dimensionnement du conducteur neutre (NFC 15-100)

2.7.1.1. Schémas *TT*, *TN-S*

■ circuits monophasés ou triphasés de section $\leq 16 \text{ mm}^2$ cuivre ou 25 mm^2 aluminium

La section du neutre doit être égale à celle des conducteurs de phase.

■ circuits triphasés de section $> 16 \text{ mm}^2$ cuivre ou 25 mm^2 aluminium

La section du neutre peut être choisie :

- égale à celle des conducteurs de phase ou
- inférieure à condition que :
 - . le courant susceptible de parcourir le conducteur neutre en service normal soit inférieur à son courant admissible (l'influence des harmoniques 3 et multiple de 3 doit, en particulier, être prise en compte, dans ce cas la section du neutre peut être supérieure à celle des phases, voir § 6.2. - harmoniques)
 - . la puissance transportée par le circuit soit principalement absorbée par des appareils alimentés entre phases (puissance monophasée $< 10 \%$ de la puissance totale transportée)
 - . le conducteur neutre soit protégé contre les surintensités.

2.7.1.2. Schéma *TN-C*

Les mêmes conditions que ci-dessus s'appliquent en théorie, mais leur intérêt s'amointrit puisqu'il est interdit d'insérer tout dispositif de protection dans le neutre devenu prioritairement un conducteur de protection.

2.7.1.3. Schéma *IT*

Il est, en général, déconseillé de distribuer le neutre.

Lorsqu'il est nécessaire de distribuer, les conditions décrites ci-dessus pour les schémas *TT* et *TNS* sont applicables.

2.7.2. Sectionnement

Les dispositions retenues par la norme C15-100 sont les suivantes :

- tout circuit doit pouvoir être sectionné sur chacun de ces conducteurs actifs (NFC 15-100 § 461 et 462)
- le conducteur *PEN* ne doit jamais être coupé, ni sectionné (NFC 15-100 § 461 et 462)
- le neutre étant un conducteur actif au même titre que les conducteurs de phase l'application de ces dispositions conduit aux règles suivantes :
 - . dans le schéma *TNC* le *PEN* ne doit être ni coupé, ni sectionné
 - . dans les schémas *TNS*, *TT* et *IT* le neutre doit pouvoir être sectionné et coupé.

2.7.3. Protection du conducteur neutre

- **installations dont le point neutre est relié directement à la terre**
(schémas *TT* ou *TN* - norme NFC 15-100 § 473.3.2.1)

Lorsque la section du conducteur neutre est au moins égale à celle des conducteurs de phase, il n'est pas nécessaire de prévoir une détection de surintensité sur le conducteur neutre.

Lorsque la section du conducteur neutre est inférieure à celle des conducteurs de phase, il est nécessaire de prévoir une détection de surintensité sur le conducteur neutre, appropriée à la section de ce conducteur.

Toutefois, dans ce cas il est admis de ne pas prévoir de détection de surintensité sur le conducteur neutre si les deux conditions suivantes sont simultanément remplies :

- le conducteur neutre est protégé contre les courts-circuits par le dispositif de protection des conducteurs de phase du circuit
- le courant maximal susceptible de parcourir le conducteur neutre est en service normal nettement inférieur à la valeur du courant admissible dans ce conducteur.

■ **installations dont le point neutre n'est pas relié directement à la terre**
(schéma *IT* - norme NFC 15-100 § 473.3.2.2)

Lorsqu'il est nécessaire de distribuer le conducteur neutre, il y a lieu de prévoir une détection de surintensité sur le conducteur neutre de tout circuit, détection qui doit entraîner la coupure de tous les conducteurs actifs du circuit correspondant, y compris le conducteur neutre.

Cette disposition n'est pas nécessaire si :

- le conducteur neutre considéré est effectivement protégé contre les courts-circuits par un dispositif de protection placé en amont, par exemple à l'origine de l'installation, conformément aux règles énoncées à l'article 434.3.2. de la norme C15-100
- ou si le circuit considéré est protégé par un dispositif de protection à courant différentiel-résiduel dont le courant différentiel-résiduel assigné est au plus égal à 0,15 fois le courant admissible dans le conducteur neutre correspondant : ce dispositif doit couper tous les conducteurs actifs du circuit correspondant, y compris le conducteur neutre.

■ **coupure du conducteur neutre** (NFC 15-100 § 473.3.3)

Lorsque la coupure du conducteur neutre est prescrite, la coupure et la fermeture de ce conducteur doivent être telles qu'il ne soit jamais coupé avant les conducteurs de phase et qu'il soit fermé en même temps ou avant les conducteurs de phase.

2.8. Protection et coupure des conducteurs de phase

2.8.1. Coupure des conducteurs de phase

En vertu des articles 461 et 462 de la norme C15-100, chaque conducteur de phase doit pouvoir être coupé et sectionné.

2.8.2. Protection des conducteurs de phase (norme NFC 15-100 § 473.3.1)

La détection de surintensité doit être prévue sur tous les conducteurs de phase, elle doit provoquer la coupure du conducteur dans lequel la surintensité est détectée, mais ne provoque pas nécessairement la coupure des autres conducteurs actifs.

Toutefois, dans les schémas *TT* et *TN*, sur les circuits alimentés entre phases et dans lesquels le conducteur neutre n'est pas distribué, la détection de surintensité peut ne pas être prévue sur l'un des conducteurs de phase, sous réserve que les conditions suivantes soient simultanément remplies :

- il existe, en amont ou au même niveau, une protection différentielle devant provoquer la coupure de tous les conducteurs de phase
- il ne doit pas être distribué de conducteur neutre à partir d'un point neutre artificiel sur les circuits situés en aval du dispositif de protection différentielle visé ci-dessus.

2.9 Influence sur l'appareillage des règles de coupure et protection du conducteur neutre et des conducteurs de phase.

L'application aux disjoncteurs de l'ensemble des règles énoncées précédemment est synthétisée dans le tableau 2-11.

		Schéma des liaisons à la terre			
		<i>TT</i>	<i>TN - C</i>	<i>TN - S</i>	<i>IT</i>
Rappel : protection contre les contacts indirects		Par DDR	assurée par disjoncteur ou fusible	assurée par disjoncteur ou fusibles	par disjoncteur ou fusibles
Circuit à protéger					
monophasé	$P - N$				
biphasé	$2 P$				
triphasé	$3 P$				
tétraphasé	$3 P - N$ $S_n = S_{ph}$				
tétraphasé	$3 P - N$ $S_n < S_{ph}$				

Tableau 2-11 : règles de coupure et de choix de l'appareillage

: ce symbole matérialise les déclencheurs sur court-circuit et sur surcharge des disjoncteurs.

- (A) NF C 15-100 §473.3.1.2 : autorisé en schéma TT et TN en présence d'un DDR à l'origine du circuit ou en amont et si aucun neutre artificiel n'est distribué en son aval.
- (B) NF C 15-100 §473.3.2.1.c : autorisé en schéma TT et TN si le conducteur neutre est protégé contre les courts-circuits par dispositifs de protection contre les défauts entre phases et si le courant de service normal est inférieur notablement au courant admissible dans ce conducteur.
- (C) NF C 15-100 §473.3.2.2 : autorisé en schéma IT dans certaines conditions : si le circuit fait partie d'un ensemble de départs terminaux homogène dont les calibres extrêmes ne dépassent pas le rapport 2 et à condition qu'en amont de ces départs soit installé un DDR de sensibilité inférieure ou égale à 15% du calibre du plus petit départ.

2.10 Interaction entre haute tension et basse tension (voir fig.2-50-e)

Tout défaut d'isolement se produisant sur la partie haute tension d'un poste haute tension – basse tension a des répercussions sur le réseau basse tension qu'il alimente ; on assiste en particulier au développement de surtensions et à des élévations du potentiel des masses qui peuvent entraîner des claquages de matériels et être dangereuses pour les personnes, si les dispositions pour limiter leurs risques ne sont pas prises à la conception de l'installation.

La description de ces phénomènes et les dispositions à prendre pour s'en protéger, sont décrites au chapitre 5.3.2.1.-surtensions. Leur développement dépend de la configuration des prises de terre du neutre et des masses ainsi que du mode de liaison à la terre des masses du poste et de l'installation. Pour leurs études, les normes NFC 15-100 et CEI 364 ont retenu les sept schémas regroupés dans le tableau 2-12, leur comportement lors d'un défaut d'isolement sur la partie haute tension du poste est analysé au chapitre 5.3.2.1.-surtensions.

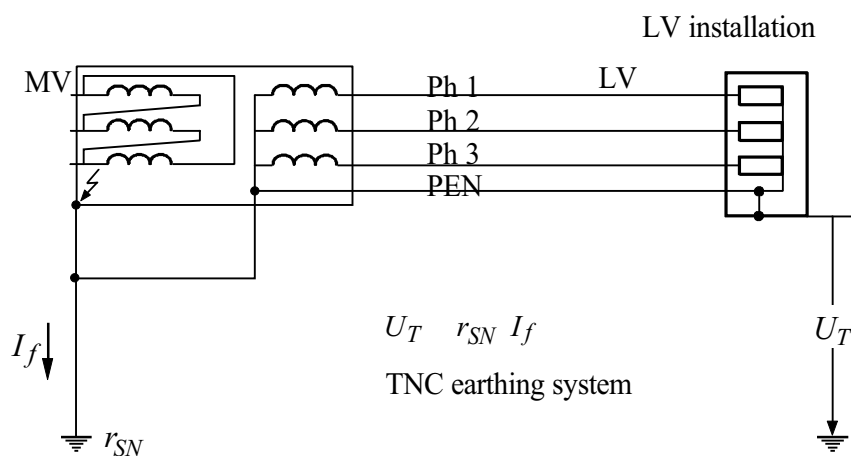


Figure 2-50-e : exemple d'élévation du potentiel des masses BT pour un défaut sur la partie haute tension du poste.

Schéma TNR

- le neutre du transformateur HT/BT est mis directement à la terre
- les masses de l'installation BT sont reliées au conducteur neutre
- les masses du poste sont reliées à la prise de terre du neutre.

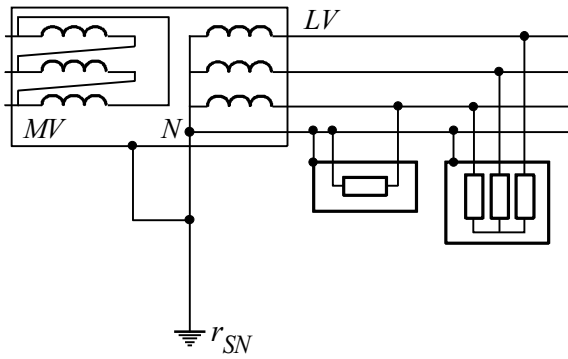


Schéma TNS

- le neutre du transformateur HT/BT est mis directement à la terre
- les masses de l'installation BT sont reliées au conducteur neutre
- les masses du poste sont reliées à une prise de terre séparée de la prise de terre du neutre.

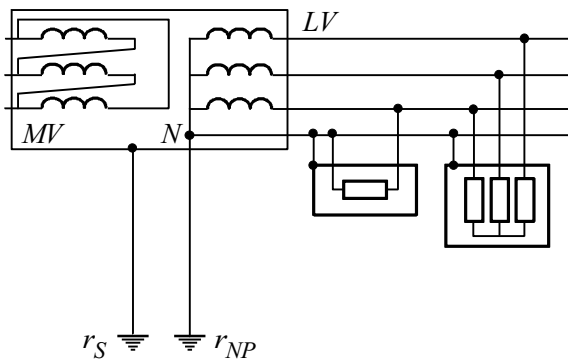


Schéma TTN

- le point neutre du transformateur HT/BT est mis directement à la terre
- les masses de l'installation BT sont interconnectées et reliées à une prise de terre séparée de celle du neutre
- les masses du poste sont reliées à la prise de terre du neutre.

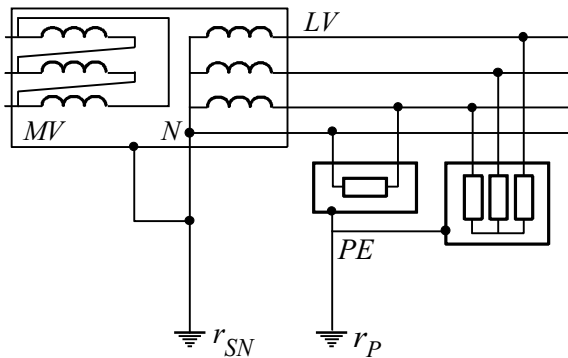
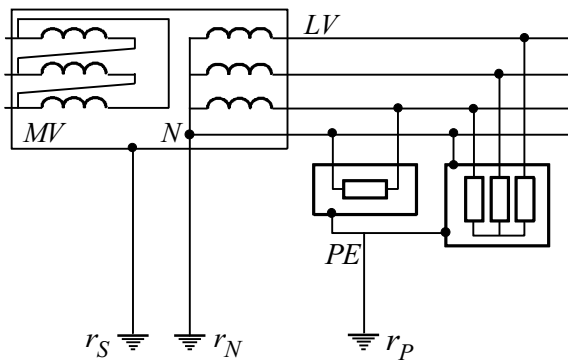


Schéma TTS

- le point neutre du transformateur HT/BT est mis directement à la terre
- les masses de l'installation BT sont interconnectées et reliées à une prise de terre séparée de celle du neutre
- les masse du poste sont reliées à une prise de terre séparée de celle du neutre et celle des masses de l'installation.



<p>Schéma ITR</p> <ul style="list-style-type: none"> - le neutre du transformateur HT/BT est isolé ou relié à la terre par une impédance - les masses de l'installation BT sont interconnectées et reliées à la prise de terre du neutre - les masses du poste sont reliées à la prise de terre du neutre. 	
<p>Schéma ITN</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le point neutre du transformateur HT/BT est isolé ou relié à la terre par une impédance - Les masses de l'installation BT sont interconnectées et reliées à une prise de terre séparée de celle du neutre - les masses du poste sont reliées à la prise de terre du neutre. 	
<p>Schéma ITS</p> <ul style="list-style-type: none"> - le point neutre du transformateur HT/BT est isolé ou relié à la terre par une impédance - les prises de terre du poste, du neutre et des masses de l'installation sont séparées. 	

Tableau 2-12 : interactions entre haute et basse tension

2.11 Comparaison des différents régimes du neutre basse tension-choix

2.11.1 Comparaison des différents régimes du neutre

2.11.1.2 Schéma TT

- C'est la solution la plus simple à mettre en œuvre. En France, il est utilisable pour les installations alimentées directement par le réseau de distribution publique basse tension.
- Il ne nécessite pas de surveillance particulière, seul un contrôle périodique des dispositifs différentiels peut être nécessaire
- La protection est assurée par des dispositifs différentiels résiduels (*DDR*) qui permettent en plus la prévention des risques d'incendie lorsque leur sensibilité est $\leq 500\text{Ma}$
- Chaque défaut d'isolement entraîne une coupure. Cette coupure peut-être limitée au seul circuit en défaut par la mise en place d'une sélectivité approprié
- Les récepteurs ou parties d'installation, qui génèrent des courants de fuite importants, doivent être équipés de *DDR* appropriés afin d'éviter les déclenchements intempestifs.

2.11.1.2 Schéma TN

- En France, il est utilisable uniquement dans les installations alimentés par un transformateurs HT/BT ou BT/BT privé
- Il nécessite la mise à la terre régulière du conducteur de protection
- Il impose la vérification du fonctionnement des dispositifs de protection contre les défauts entre phases pour un défaut d'isolement
- Il nécessite que toute modification ou extension soit réalisée par du personnel compétent maîtrisant des règles de mise en œuvre
- Il peut entraîner, lors d'un défaut d'isolement, une détérioration importante des bobinages des machines tournantes et des matériels sensibles
- Il peut présenter, dans les locaux à risque d'incendie, un danger élevé du fait de l'importance des courants de défaut.

Le schéma *TN – C*:

- Il peut faire apparaître une économie à l'installation par la suppression d'un pôle et d'un conducteur
- Il implique l'utilisation de canalisations fixes et rigides (NF C 15-100§413.1.3.2)
- Il est interdit dans les locaux présentant un risque d'incendie
- Il génère, lors des défauts d'isolement, un niveau important de perturbations électromagnétiques qui peuvent endommager les équipements électroniques sensibles ou perturber leur fonctionnement
- Les courants de déséquilibre, les harmoniques 3 et multiples de 3 circulent dans le conducteur de protection *PEN* et peuvent être la cause de perturbations multiples.

Le schéma *TN – S*

- Il s'emploie même en présence de conducteurs souples ou de canalisation de faible section
- Il permet par la séparation du neutre et du conducteur de protection, de maintenir une bonne équipotentialité des masses et de réduire le niveau de perturbations électromagnétiques. Il est ainsi recommandé pour les locaux informatiques
- Il est obligatoire dans les locaux présentant des risques d'incendie, si l'installation est en *TN*

2.11.1.3 Schéma *IT*

- En France, il est utilisable uniquement dans les installations alimentés par un transformateur HT/BT ou BT/BT privé
- C'est la solution assurant la meilleure continuité de service
- La signalisation du premier défaut d'isolement suivie de sa recherche et de son élimination, permet une prévention systématique se toute interruption d'alimentation
- Il nécessite un personnel d'entretien pour la surveillance et l'exploitation
- Il nécessite un bon niveau d'isolement du réseau
- Il nécessite que toute modification ou extension soit réalisée par du personnel compétent maîtrisant ses règles de mise en œuvre
- Il implique la fragmentation du réseau si celui-ci est très étendu et l'alimentation des récepteurs à courant de fuite important par un transformateur de séparation
- Il impose la vérification du fonctionnement des dispositifs de protection contre les défauts entre phases lors d'un double défaut d'isolement.

2.11.2 Choix d'un régime de neutre

2.11.2.1. Performances des régimes du neutre

Les performances des régimes du neutre s'apprécient selon les six critères suivants :

- La protection contre les chocs électriques
- La protection contre l'incendie d'origine électrique
- La continuité de l'alimentation
- La protection contre les surtensions
- La protection contre les perturbations électromagnétiques
- Les contraintes de mise en œuvre

■ Protection contre les chocs électriques

Tous les régimes de neutre permettent d'assurer une égale protection contre les chocs électriques, dès lors qu'ils sont mis en œuvre et utilisés en conformité avec les normes.

■ Protection contre les risques d'incendie

□ Schéma *TT* et *IT*

Dans le schéma *TT* et *IT* lors d'un premier défaut d'isolement, l'intensité du courant générée par le défaut est respectivement faible ou très faible, et le risque d'incendie est plus faible qu'en schéma *TN*.

□ Schéma *TN – C*

Le schéma *TN – C* présente un risque d'incendie élevé. En effet, le courant de déséquilibre des charges parcourt en permanence non seulement le conducteur *PEN*, mais aussi les éléments qui y sont raccordés : charpentes métalliques, masses, blindages, etc...et risque de provoquer un incendie. En cas de défaut franc, l'intensité du courant générée par le défaut d'isolement est élevée et le risque est important. En cas de défaut impédant, le schéma *TN – C* réalisé sans dispositifs différentiels est obligatoire. C'est la raison pour laquelle il est interdit dans les locaux à risque d'explosion ou d'incendie.

■ Continuité de l'alimentation

Le choix du schéma *IT* évite toutes les conséquences néfastes du défaut d'isolement :

- Le creux de tension
- Les effets perturbateurs du courant de défaut
- Les dommages aux équipements
- L'ouverture du départ en défaut

Son exploitation correcte rend le second défaut réellement improbable et permet aussi de garantir la continuité de l'alimentation.

■ Protection contre les surtensions

Dans tous les schémas, une protection contre les surtensions peut-être nécessaires. Pour plus de détails concernant la mise en place de ces mesures, on se reportera au chapitre 5.

■ Protection contre les perturbations électromagnétiques

Le choix du Schéma est indifférent :

- Pour toutes les perturbations de mode différentiel
- Pour toutes les perturbations de mode commun ou de mode différentiel de fréquence supérieure au MHz.

Les schémas *TT*, *TN-S* et *IT* peuvent, satisfaire tous les critères de comptabilité électromagnétique s'ils sont correctement mis en œuvre. On notera seulement que le schéma *TN-S* amène davantage de perturbations pendant la durée du défaut, car le courant de défaut est plus élevé.

En revanche les schémas *TN-C* ou *TN-C-S* sont déconseillés. En effet, dans ces schémas, le conducteur *PEN*, les masses des matériels et les blindages des câbles sont parcourus par un courant permanent lié au déséquilibre des charges et à la présence des courants harmoniques 3 et multiple de 3.

■ Contraintes de mise en œuvre

Le schéma *TT*, ainsi que le schéma *TN – S* réalisé avec dispositifs différentiels, sont les plus simples à mettre en œuvre.

Le schéma *TN – S* réalisé sans dispositifs différentiels, les schémas *TN – C* et *IT* imposent la vérification du fonctionnement des dispositifs de protection contre les défauts entre phases, cela entraîne en limitation des longueurs maximales des canalisations et nécessite l'intervention d'un personnel qualifié pour la réalisation des extensions et des modifications de l'installation.

2.11.3.3 Choix et recommandations d'emploi (voir tableau 2-13)

Lorsque le choix du régime de neutre est possible, celui-ci s'effectue au cas par cas, à partir des contraintes liées à l'installation électrique, aux récepteurs et aux besoins de l'exploitant.

Il est souvent avantageux de ne pas faire un choix unique pour l'ensemble de l'installation.

■ Le schéma *IT* est recommandé pour les installations peu surveillées et évolutives

En effet, c'est le schéma le plus simple à mettre en œuvre et à exploiter.

■ Le schéma *IT* est recommandé s'il y a un impératif de continuité de service

En effet, le schéma *IT* garantit la meilleure disponibilité de l'énergie.

En revanche, il demande :

- Le respect des règles de mise en œuvre
- la prise en compte des problèmes générés par les courants de fuite
- un service d'entretien compétent pour la recherche et l'élimination du premier défaut d'isolement ainsi que pour les extensions et modifications de l'installation.

■ **le schéma $TN - S$ est recommandé pour les installations peu évolutives**

Il est réalisé en général dans différentiel.

Les courants générés par un défaut d'isolement sont importants et peuvent provoquer :

- des perturbations passagères
- des risques de dommages élevés
- des incendies.

Il demande comme l' IT le respect des règles de mise en œuvre.

Si des dispositifs différentiels de moyenne sensibilité sont installés, ils apportent à ce schéma une meilleure protection contre l'incendie et une souplesse à la conception et à l'exploitation.

■ **en termes de tenue aux surtensions et perturbations électromagnétiques, les schémas IT, TT et $TN - S$ réalisés selon les règles de l'art sont généralement satisfaisants ; le schéma TNC ou $TNC - S$, par contre, est déconseillé, en effet il présente des risques permanents, en particulier :**

- chutes de tension le long du PEN
- circuloire de courant dans les éléments conducteurs, les blindages, et les masses
- champ magnétique rayonné
- absence de protection contre les défauts d'isolement impédants
- en cas de défaut franc, l'intensité du courant est élevée d'où risque de dommages importants.

	<i>TNC</i>	<i>TNS</i>	<i>TT</i>	<i>IT</i>
Récepteurs sensibles aux courants de défaut	D	D	P	C
Récepteurs sensibles aux perturbations électromagnétiques	D	C	P	P
Locaux à risques d'incendie	I	D(1)	P(1)	C(1)
Installations avec modifications fréquentes	D	D	C	D
Installation où la continuité des circuits de terre est incertaine (chantiers)	D	P	C	D
Recherche de la continuité de service	D	D	D	C
Réseau, récepteurs avec courants de fuites importants	C	C	P	D

(1)avec *DDR* de sensibilité <500mA

C : Conseillé
P : Possible
D : Déconseillé
I : Interdit

Tableau 2-13 : choix du régime du neutre

2.11.2.3 Bilan économique

Tout bilan économique doit englober tous les coûts :

- les études de conception
- les coûts des matériels
- la maintenance
- les modifications et extensions
- les arrêts de production

L'attention est attirée sur le fait que seul un bilan économique complet reflète réellement l'intérêt de l'utilisateur final.

2.12 Régimes de neutre utilisés en haute tension

2.12.1 Principes et schémas utilisés en haute tension

Lorsque l'on considère, sans distinction, les réseaux de distribution publique et les réseaux privés industriels ou tertiaires, on rencontre tous les principes de mise à la terre du point neutre. A savoir :

- le neutre mis directement à la terre
- le neutre isolé
- le neutre mis à la terre par résistance
- le neutre mis à la terre par réactance
- le neutre mis à la terre par bobine d'extinction de Petersen partiellement ou totalement accordée.

Ces principes sont rappelés dans le tableau 2-14. Les avantages et inconvénients de chaque schéma sont détaillés dans le tableau 2-15.

Sur le plan normatif, seule la norme française NF C 13-200 donne une définition précise des régimes du neutre et établit leurs règles de mise en œuvre, ils sont définis par un code à trois lettres : norme NFC 13 200 – article 312

■ la première lettre précise la situation du point neutre par rapport à la terre

On distingue :

- les installations dont le point neutre est relié directement à la terre, installations désignées par la première lettre *T*.
- Les installations dont le point neutre est isolé ou relié à la terre par l'intermédiaire d'une impédance, installations désignées par la première lettre *I*.

■ La deuxième lettre précise la situation des masses

On distingue :

- Les installations dont les masses sont reliées directement au point neutre mis à la terre, installations désignées par la deuxième lettre *N*
- les installations dont les masses sont reliées directement à la terre, indépendamment de la mise à la terre éventuelle du neutre, installations désignées par la deuxième lettre *T*.

■ La troisième lettre précise les liaisons éventuelles entre les masses du poste, le point neutre et les masses de l'installation

On distingue :

- Les installations dont les masses du poste d'alimentation sont reliées à une prise de terre commune au neutre et aux masses de l'installation, installations désignées par la troisième lettre *R*
- Les installations dont les masses du poste d'alimentation sont reliées à une prise de terre du neutre, les masses de l'installation étant reliées à une prise de terre séparée, installations désignées par la troisième lettre *N*
- les installations dont les masses du poste d'alimentation, le neutre et les masses de l'installation sont reliées à des prises de terre séparées, installations désignées par la troisième lettre *S*

En pratique la norme C13-200 n'a retenu que les six schémas représentés par le tableau 2-14.

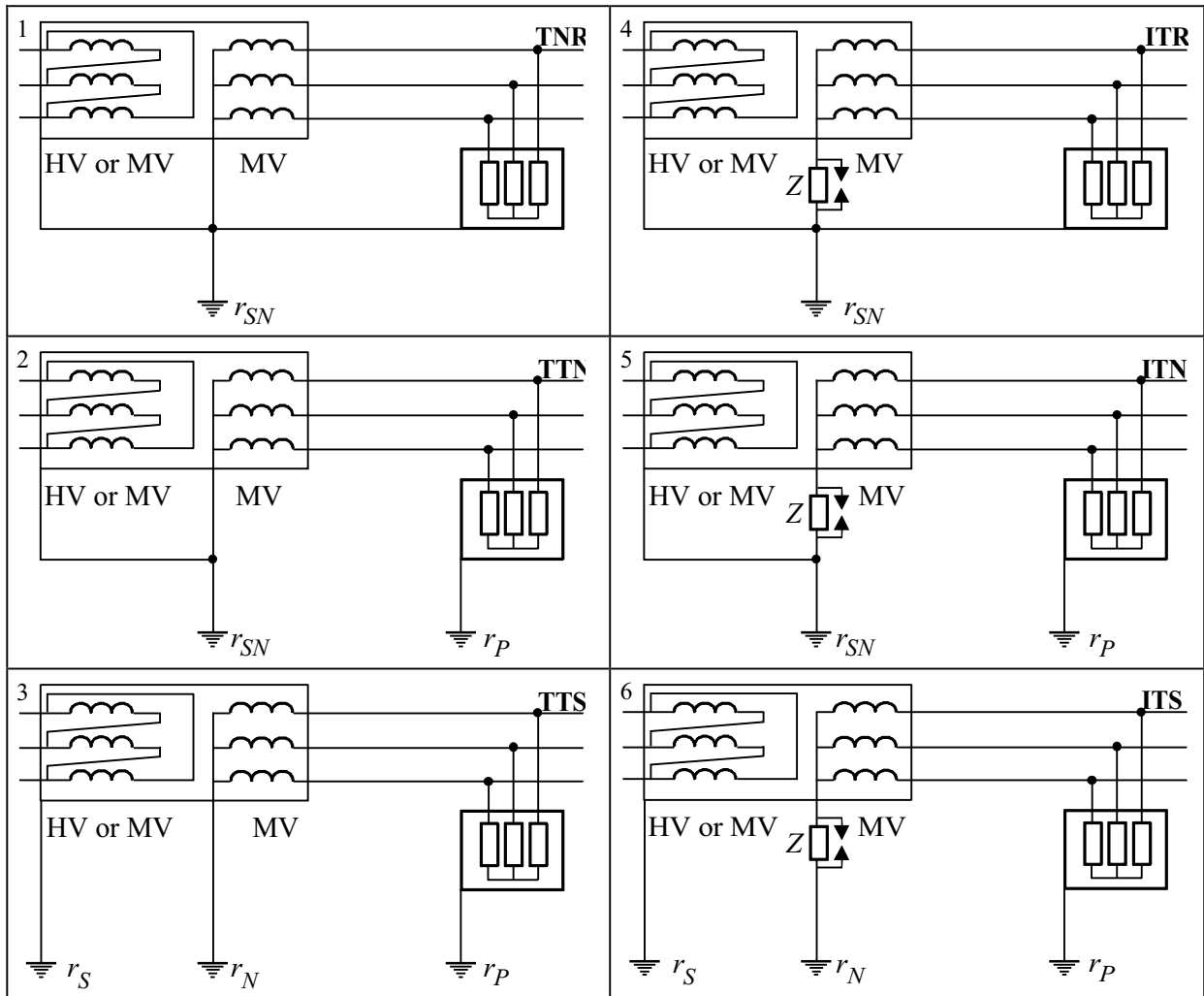


Tableau 2-14. Définition des régimes du neutre en haute tension

2.12.2 Schémas recommandés dans les installations industrielles ou tertiaires

En distribution publique, on rencontre tous les types de régime du neutre mentionnés dans le tableau 2-14.

Les choix varient suivant les pays, du neutre direct à la terre au neutre compensé, ils ont été faits il y a plusieurs décennies et sont dans certains cas plus ou moins adaptés à la situation actuelle des réseaux et aux conditions d'environnement. On assiste ainsi progressivement à une remise en question des choix initiaux et à la convergence vers un neutre mis à la terre par bobine de compensation partiellement accordée. Un choix raisonné est toujours un compromis, il met en œuvre des phénomènes multiples et complexes ainsi que des considérations d'ordre économique. Ce sujet ne sera pas abordé dans ce document qui se limite aux réseaux et installations privés de faible et moyenne étendue.

Pour les réseaux et installations privées, il est conseillé d'utiliser un neutre mis à la terre par résistance de limitation ou un neutre isolé lorsque la continuité de service est impérative, ce dernier permet, en effet la non coupure de l'alimentation lors d'un premier défaut d'isolement.

Le neutre mis à la terre directement ou par une bobine accordée est déconseillé. Le neutre direct à la terre génère des courants de défauts très élevés toujours préjudiciables au récepteur et entraînant le développement de tensions de contact pouvant dépasser un millier de volts.

Le neutre mis à la terre par bobine accordée demande une mise en œuvre délicate et coûteuse ; il ne peut être raisonnablement envisagé que pour des réseaux très étendus pour lesquels on souhaite la non coupure de l'alimentation lors d'un premier défaut d'isolement, ce qui, dans la pratique, est relativement rare.

Les techniques d'exploitation, avantages et inconvénients de chaque régime du neutre sont indiqués dans le tableau 2-16.

■ neutre mis à la terre par inductance de limitation		
Technique d'exploitation	Avantages	Inconvénients
- coupure au premier défaut d'isolement.	<ul style="list-style-type: none"> - limite les courants de défaut (dégâts et perturbations réduits) - permet la mise en oeuvre de protections sélectives simples si : 	<ul style="list-style-type: none"> - peut provoquer des surtensions importantes lors de l'élimination des défauts à la terre - déclenchement obligatoire au premier défaut.
$I_L \gg I_C$		
■ neutre mis à la terre par inductance de limitation accordée (bobine d'extinction de Petersen)		
Technique d'exploitation	Avantages	Inconvénients
- non coupure au premier défaut, sous réserve de respecter le décret sur la protection des travailleurs.	<ul style="list-style-type: none"> - si la réactance est telle que la condition : $3 L C \omega^2 = 1$ <p>est respectée, le courant de défaut phase-terre est nul. Ceci permet :</p> <ul style="list-style-type: none"> . l'extinction spontanée des défauts à la terre non permanents . le maintien en service de l'installation malgré un défaut permanent, le déclenchement se produisant obligatoirement au deuxième défaut (le respect du décret du 14 novembre 1998 est obligatoire) . le premier défaut est signalé par la détection du passage du courant dans la bobine. La bobine est dimensionnée pour un fonctionnement permanent. 	<ul style="list-style-type: none"> - difficultés pour réaliser la condition : $3 L C \omega^2 = 1$ <p>en raison de l'incertitude qui existe sur la connaissance de la capacité du réseau : il en résulte que, pendant la durée du défaut, un courant résiduel circule dans le défaut ; il faut s'assurer que ce courant ne présente pas de danger pour le personnel et le matériel</p> <ul style="list-style-type: none"> - par suite des différences de valeur des capacités phase-terre, un courant circule dans la bobine, même en fonctionnement normal - les risques de surtensions sont importants - demande la présence d'un personnel de surveillance - protection sélective impossible à réaliser au premier défaut si l'accord : $3 L C \omega^2 = 1$ <p>est réalisé ; dans le cas d'un désaccord systématique $(3 L C \omega^2 \neq 1)$ la protection sélective au premier défaut est complexe et onéreuse.</p>

Tableau 2-16 (suite) : comparaison des différents régimes du neutre en moyenne tension

2.12.3. Le contact indirect en haute tension suivant le régime du neutre

L'apparition d'une tension de contact peut résulter :

- soit d'un défaut d'isolement dans un matériel de l'installation considérée
- soit d'un défaut d'isolement survenant sur le réseau d'alimentation au niveau du poste de transformation.

La valeur prise par la tension de contact est comme en basse tension étroitement liée au régime du neutre du réseau dans lequel elle se développe, ainsi qu'à la présence ou non d'interconnexion entre les masses de l'installation et la prise de terre du neutre.

2.12.3.1. Cas des schémas *TNR-TTN* et *TTS*

Le neutre est relié directement à la terre, les masses de l'installation sont interconnectées et reliées, soit à une prise de terre séparée (schémas *TTN* et *TTS*), soit à la prise de terre du neutre (schémas *TNR*).

■ cas des schémas *TTN* et *TTS* (voir fig. 2-51)

Lors d'un défaut d'isolement dans l'installation, le courant de défaut se referme par la prise de terre des masses r_M et la prise de terre du neutre r_N ou r_{PN} . La masse en défaut est alors approximativement portée au potentiel :

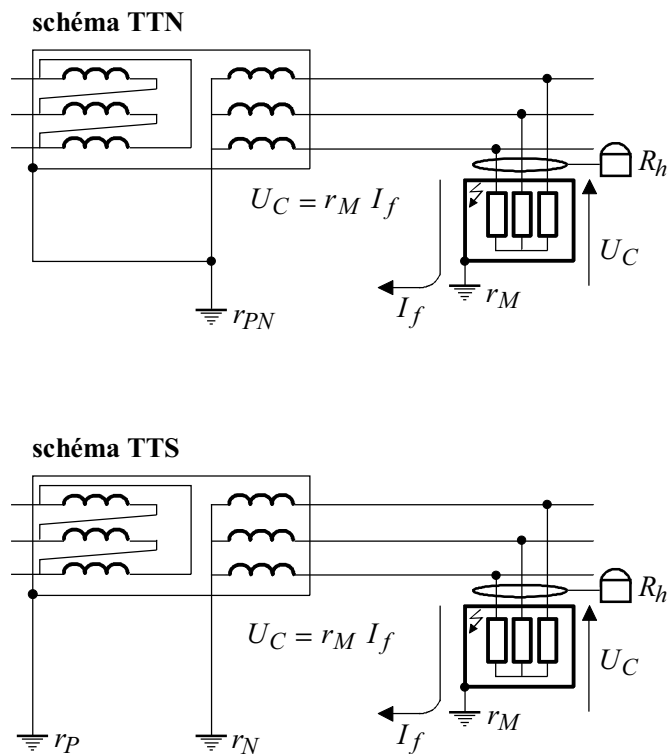
$$U_C = \frac{V \cdot r_M}{r_M + r_N}$$

pour : $V = 6\,000 / \sqrt{3}$ Volts

$$r_M = 2 \Omega$$

$$r_N = r_{PN} = 1 \Omega$$

on a : $U_C = \frac{6\,000 \times 2}{\sqrt{3}(2+1)} = 2\,309$ Volts



- r_{PN} : résistance de la prise de terre commune aux masses du poste et au neutre
 r_N : résistance de la prise de terre du neutre
 r_P : résistance de la prise de terre des masses du poste
 r_M : résistance de la prise de terre des masses de l'installation
 I_f : courant de défaut pour un défaut se produisant dans l'installation
 U_C : tensions de contact
 R_h : dispositif de protection sensible au courant résiduel

Figure 2-51 : contact indirect dans le cas des schémas TTN, TTS

■ cas du schéma TNR (voir fig. 2-52)

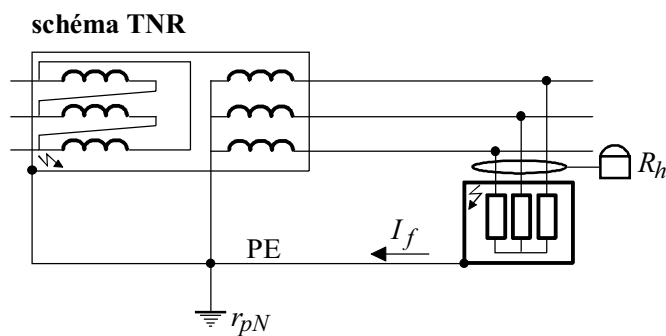
Toutes les masses de l'installation sont interconnectées et reliées à la prise de terre du neutre. Lors d'un défaut, le courant se referme par le conducteur de protection ; il n'est limité que par l'impédance de la boucle de défaut comprenant le transformateur, les conducteurs de la phase en défaut et le conducteur de protection. La tension de contact qui apparaît au niveau d'une masse en défaut est égale à la chute de tension qui se développe le long du conducteur de protection reliant cette masse à la prise de terre commune.

Dans ces conditions et avec les hypothèses simplificatrices suivantes :

- impédance interne du transformateur négligée
- impédance des conducteurs de phase équivalente à celle du conducteur de protection.

Il apparaît au niveau de la masse en défaut, une tension de contact U_C égale à :

$$U_C = \frac{6\,000}{2\sqrt{3}} = 1\,732 \text{ Volts}$$



- r_{pN} : résistance de la prise de terre commune aux masses du poste, au neutre et aux masses de l'installation
- I_f : courant de défaut pour un défaut se produisant au niveau de l'installation
- R_h : dispositif de protection sensible au courant résiduel

Figure 2-52 : contact indirect dans le cas des schémas TNR

Les tensions de contact qui se développent dans un réseau haute tension à neutre mis directement à la terre sont très élevées et les temps de coupure correspondant qui doivent être respectés pour assurer la sécurité des personnes ne peuvent techniquement pas être garantis par les dispositifs de protection et de coupure mise en oeuvre en haute tension (voir tableaux 2-3-a et 2-3-b). En effet, pour une tension de contact de 1000 V, le temps de coupure devrait très largement être inférieur à 40 ms, ce qui est incompatible avec les dispositifs de protection et les appareils de coupure mis en oeuvre en haute tension. La solution consiste à réaliser l'équipotentialité de l'ensemble de l'installation selon les règles exposées au chapitre 2.12.3.3.

2.12.3.2. Cas des schémas *ITR-ITN* et *ITS*

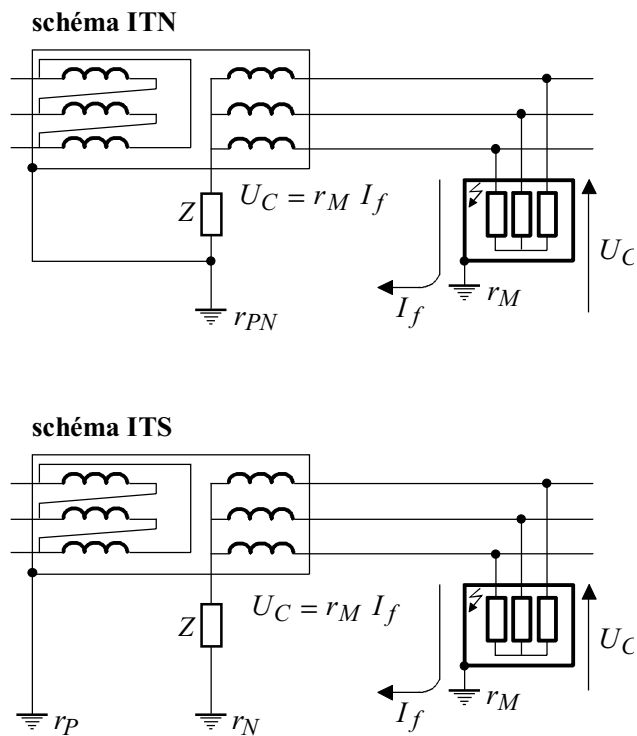
Le neutre est isolé ou relié à la terre au travers d'une impédance.

Les masses de l'installation sont interconnectées et reliées, soit à une prise de terre séparée (schémas *ITN* et *ITS*), soit à la prise de terre du neutre (schéma *ITR*).

■ cas des schémas *ITN* et *ITS* (voir fig. 2-53)

Lors d'un défaut d'isolement dans l'installation, le courant de défaut se referme par la prise de terre des masses, la prise de terre du neutre et l'impédance de mise à la terre du neutre qui peut être infinie si le neutre est isolé. La masse en défaut est alors approximativement portée au potentiel :

$$U_C = \frac{V \cdot r_M}{r_M + r_N + Z}$$



- Z : impédance de mise à la terre du neutre
- r_{PN} : résistance de la prise de terre commune aux masses du poste et au neutre
- r_M : résistance de la prise de terre des masses de l'installation
- r_N : résistance de la prise de terre du neutre
- r_P : résistance de la prise de terre du poste
- I_f : courant de défaut pour un défaut se produisant dans l'installation

Figure 2-53 : contact indirect dans le cas des schémas *ITN* et *ITS*

pour : $V = 6\,000 / \sqrt{3} \text{ Volts}$

$r_M = 2 \Omega$

$r_N = 1 \Omega$

$Z = 34 \Omega$ (limitation du courant de défaut à 100 A)

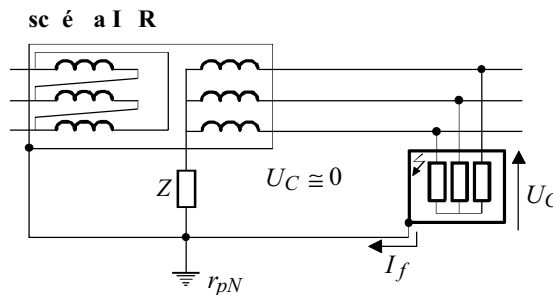
on a : $U_C = \frac{6\,000 \times 2}{\sqrt{3} (34 + 1 + 2)} = 187 \text{ Volts}$

pour : $Z = 69 \Omega$ (limitation du courant de défaut à 50 A)

on a : $U_C = \frac{6\,000 \times 2}{\sqrt{3} (69 + 1 + 2)} = 96 \text{ Volts}$

Pour $Z = \infty$ (neutre isolé), le courant de défaut est essentiellement dû au courant capacitif qui se referme par les phases saines ; pour un courant capacitif de 10 A correspondant à environ 10 km de câble, on obtient une tension de contact d'environ 20 volts au niveau d'une masse en défaut reliée à une prise de terre de 2

ITR (voir fig. -54)



- Z : impédance de mise à la terre du neutre
- r_{PN} : résistance de la prise de terre commune aux masses du poste, au neutre et aux masses de l'installation
- I_f : courant de défaut pour un défaut se produisant dans l'installation
- U_C : tension de contact

Figure 2-54 : contact indirect dans le cas du schéma *ITR*

Toutes les masses de l'installation sont interconnectées et reliées à la prise de terre du neutre. Le courant de défaut se referme par le conducteur de protection et l'impédance de mise à la terre du neutre qui peut être infinie, si le neutre est isolé. La tension de contact qui apparaît au niveau d'une masse en défaut est alors, comme dans le cas du schéma *TNR*, égale à la

terre commune. A titre d'exemple, pour un courant de défaut limité à 100 A et un conducteur mètres ayant une section de 50 mm² et une résistance d 0,02 Ω, on obtient une tension de contact de 2 Volts. Les tensions de contact deviennent donc négligeables lorsque le courant limité est faible ou que le neutre est isolé.

2.12.3.3. Conclusion concernant les tensions de contact en haute tension

En conclusion, il apparaît :

- que la mise à la terre directe du neutre conduit au développement de tensions de contact très élevées qui ne peuvent pas être éliminées dans les temps compatibles avec la sécurité des personnes (voir tableau 2-3)
- que la limitation des courants de défaut au moyen d'une impédance intercalée entre le point neutre et la terre réduit les tensions de contact à des valeurs comparables à celles que l'on rencontre dans les réseaux basse tension
- que la création d'une zone équipotentielle suivant les principes décrits figure 2-55 permet encore de réduire les valeurs des tensions de contact.

Sur la base de ces remarques, la norme C13-200 impose la règle suivante : articles 413-1-2 et 413-1-3 :

"En cas de défaut d'isolement entre une partie active et une masse, la tension de contact en tout point de l'installation ne doit pas pouvoir être supérieure à la tension limite conventionnelle U_L égale à :

- 50 V en courant alternatif dans les installations intérieures et abritées
- 25 V en courant alternatif dans les installations extérieures".

En pratique, la protection contre les contacts indirects est assurée en réalisant des liaisons équipotentielles entre toutes les masses et tous les éléments conducteurs, y compris le sol.

Ces liaisons doivent être telles que la résistance R entre deux éléments conducteurs simultanément accessibles, ne soit pas supérieure à :

$$R \leq \frac{U_C}{I_f}$$

I_f étant le courant maximal de défaut à la terre de l'installation.

L'application de ces règles conduit à la réalisation des mises à la terre conformément aux principes exposés fig. 2-55.

En complément, on retiendra que les deux seuls principes recommandés pour les installations industrielles ou tertiaire haute tension sont :

- la mise à la terre du neutre par résistance de limitation, simple à mettre en oeuvre
- le neutre isolé qui autorise la poursuite de l'exploitation en présence d'un premier défaut d'isolement.

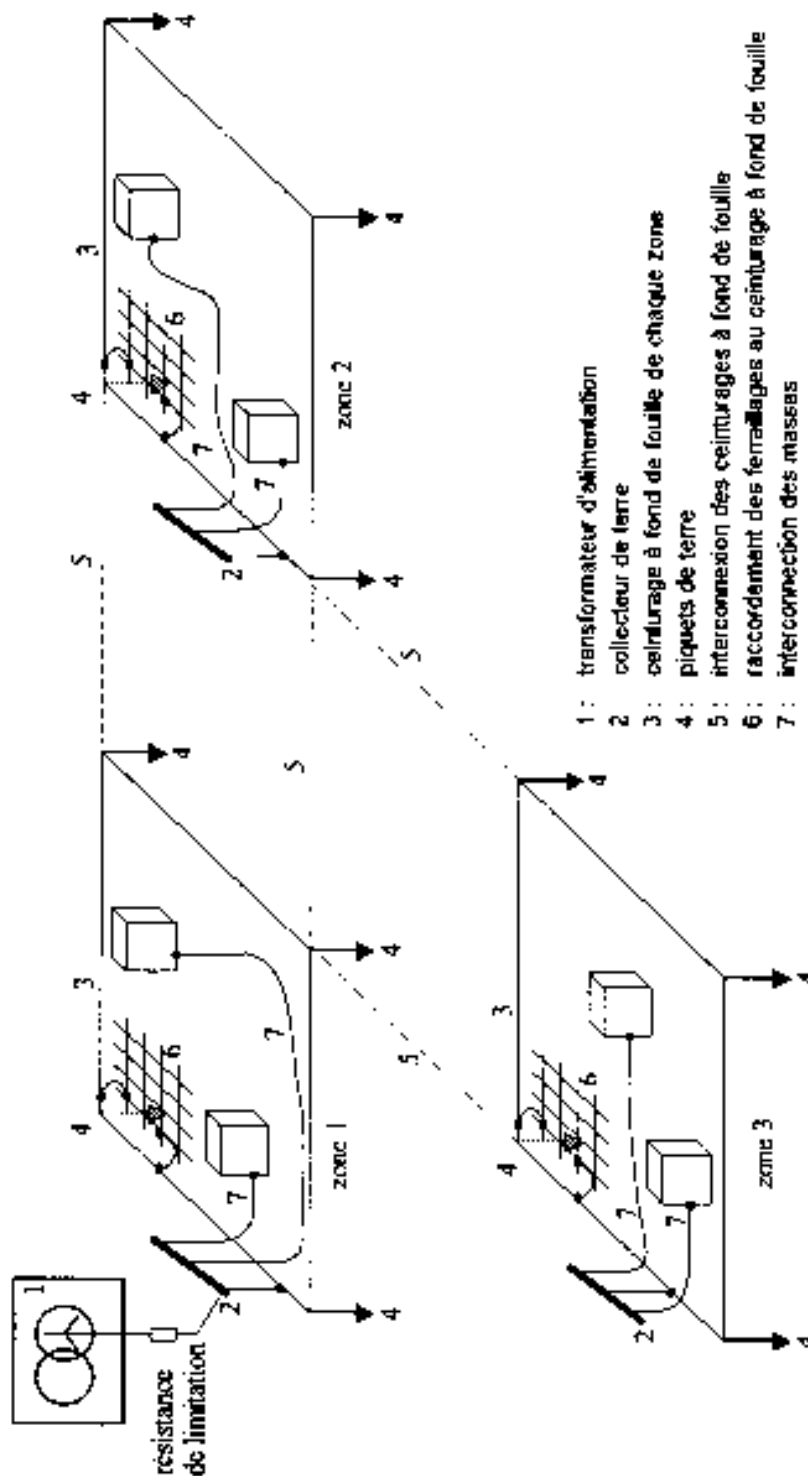


Figure 2-55 : principe de réalisation des mises à terre dans une installation haute tension

2.12.4. Mise en oeuvre du neutre mis à la terre par résistance de limitation

2.12.4.1. Choix de la valeur du courant limité

Afin de limiter les surtensions transitoires pouvant se développer dans les réseaux lors d'un défaut d'isolement, il est recommandé que le courant limité par la résistance ne soit pas inférieur au double du courant capacitif total du réseau, voir § 5.1.3.3. et fig. 2-56 :

$$I_r \geq 2 I_C$$

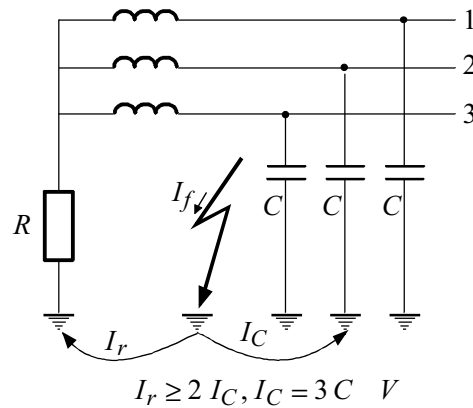
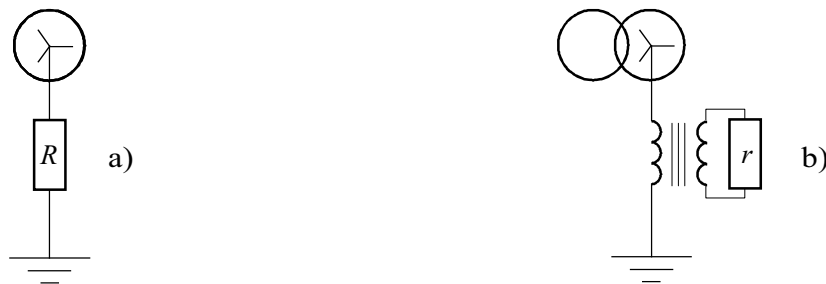


Figure 2-56 : choix du courant limite par la résistance de mise à la terre du neutre

2.12.4.2. Réalisation de la mise à la terre du point neutre

■ mise à la terre lorsque le neutre est accessible

Une résistance est intercalée entre la borne de sortie du neutre et la prise de terre, soit directement (voir fig. 2-57-a), soit par l'intermédiaire d'un transformateur monophasé chargé au secondaire par une résistance équivalente (voir fig. 2-57-b). Cette solution est applicable toutes les fois que le réseau est alimenté par un transformateur dont le secondaire est couplé en étoile avec neutre sorti, ou par un alternateur à neutre sorti.



(a) raccordement direct

(b) raccordement par l'intermédiaire d'un transformateur monophasé

Figure 2-57 : mise à la terre lorsque le neutre est accessible

■ mise à la terre par la création d'un neutre artificiel

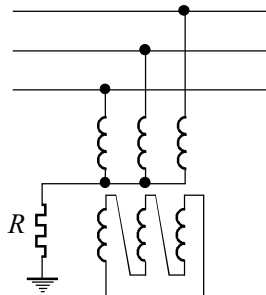
Quand le neutre de la source n'est pas accessible (enroulement en triangle), la mise à la terre est faite par un neutre artificiel appelé aussi générateur homopolaire raccordé sur le jeu de barres principal.

La réalisation de ce neutre artificiel peut être réalisée de différentes manières :

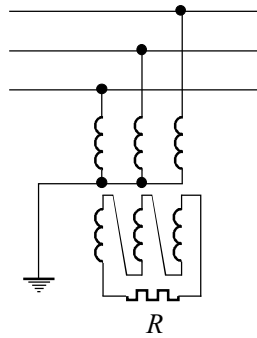
- utilisation d'un transformateur étoile-triangle, la résistance de limitation est branchée entre le point neutre du primaire et la terre, le triangle étant fermé sur lui-même (voir fig. 2-58-a)
- utilisation d'un transformateur étoile-triangle dont le point neutre primaire est directement raccordé à la terre, une résistance de limitation du courant de défaut est insérée dans le triangle secondaire (voir fig. 2-58-b), cette solution est économiquement préférable au cas (a) car la résistance est en BT au lieu d'être en HTA
- utilisation d'une bobine zigzag, la résistance de limitation étant branchée entre le point neutre de la bobine et la terre (voir fig. 2-58-c)
- utilisation d'un transformateur à trois enroulements (voir fig. 2-58-d) :
 - . le neutre du primaire couplé en étoile est directement raccordé à la terre
 - . le secondaire couplé en étoile alimente des charges
 - . le tertiaire couplé en triangle ouvert est fermé sur une résistance de limitation.

Les solutions les plus souvent rencontrées sont les schémas (b) et (c).

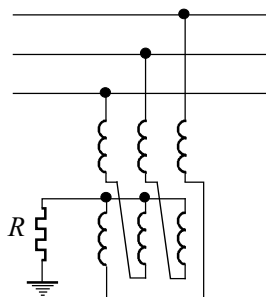
(a) Utilisation d'un transformateur étoile - triangle avec résistance dans la mise à la terre du point neutre



(b) Utilisation d'un transformateur étoile - triangle avec résistance dans le triangle



(c) Utilisation d'une bobine zigzag



(d) Transformateur à trois enroulements $YN(d) yn$

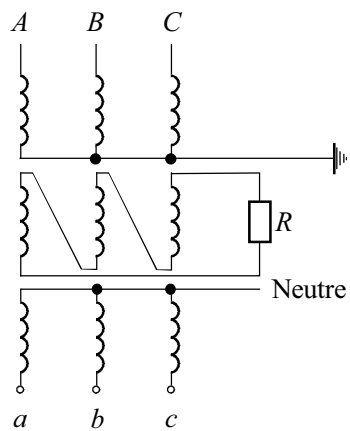


Figure 2-58 : principaux schémas pour la création d'un point neutre artificiel en haute tension

■ **problème de la mise à la terre par résistance lorsque plusieurs sources fonctionnent en parallèle sur un jeu de barres**

1er cas : chaque source possède une résistance de mise à la terre non déconnectable. Le courant de défaut à la terre varie suivant le nombre de sources en service (voir fig. 2-59-a), il est nécessaire d'utiliser des protections à maximum de courant terre directionnel pour localiser les défauts survenant sur les liaisons reliant les sources aux jeux de barres (voir § 7.4. et 10.1.5.2. du *Guide de protection des réseaux industriels*).

2ème cas : chaque source possède une résistance de mise à la terre déconnectable. Un dispositif de commutation permet d'avoir, quel que soit le nombre de source en service, qu'un seul point neutre à la terre (voir fig. 2-59-b). Le système de protection est complexe car il faut faire appel à une sélectivité logique tenant compte de la position des dispositifs de commutation et de l'état des différentes protections contre les défauts à la terre. Cette solution est très peu utilisée.

Mise à la terre directe de chaque point neutre

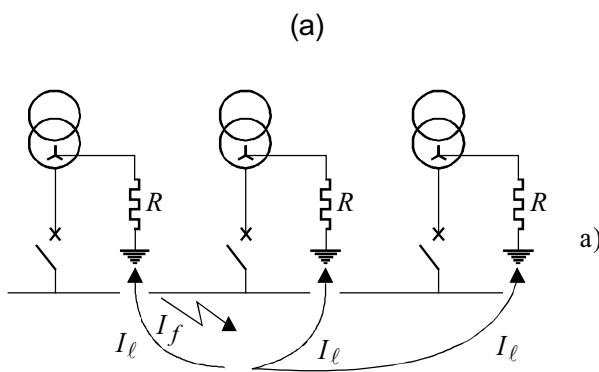
En cas de défaut d'une phase à la terre, on a :

$$I_f = n I_\ell$$

I_f : courant de défaut

n : nombre de sources en service

I_ℓ : courant limité par chaque résistance



Mise à la terre de chaque point neutre par l'intermédiaire d'un dispositif de commutation

- un dispositif de commutation est nécessaire sur chaque point neutre
- une logique de commande tenant compte de la configuration du réseau est nécessaire

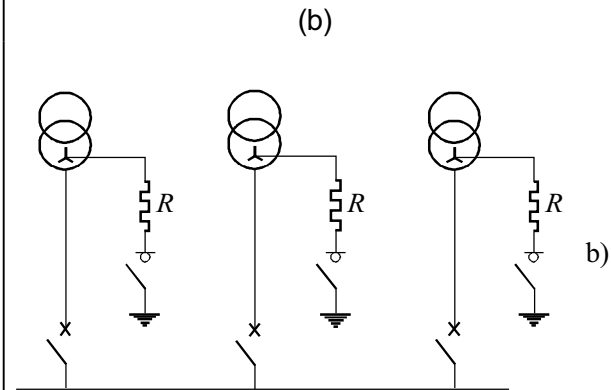


Figure 2-59 : mise à la terre du point neutre dans le cas de plusieurs sources pouvant fonctionner en parallèle

3ème cas : aucune source ne possède une résistance de mise à la terre.

Un point neutre artificiel est créé sur le jeu de barres du tableau principal (voir fig. 2-60). Ce dispositif permet d'éliminer les problèmes des 1er et 2ème cas. En effet, le courant de défaut est constant quel que soit le nombre de sources en service ; les protections à mettre en oeuvre sont simples car elles ne nécessitent plus de faire appel à des protections directionnelles ou à une logique complexe (voir § 10.1.5.2. du *Guide de protection des réseaux industriels*). On remarquera que tant qu'une source n'est pas connectée au jeu de barres, la portion de réseau, comprenant cette source et la canalisation la reliant au jeu de barres, est exploitée à neutre isolé. Lorsque ce mode d'exploitation est fréquent, des dispositions particulières doivent être prises pour surveiller l'isolement de cette portion de réseau, la surveillance peut être effectuée par un relais de tension résiduelle branché aux bornes de la source.

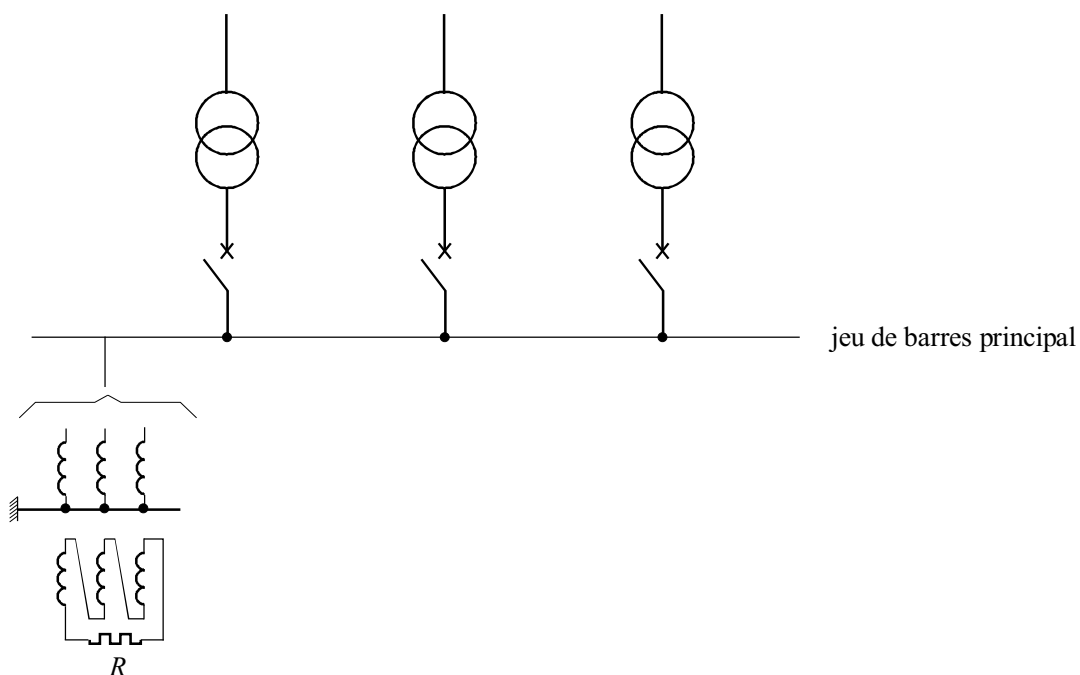
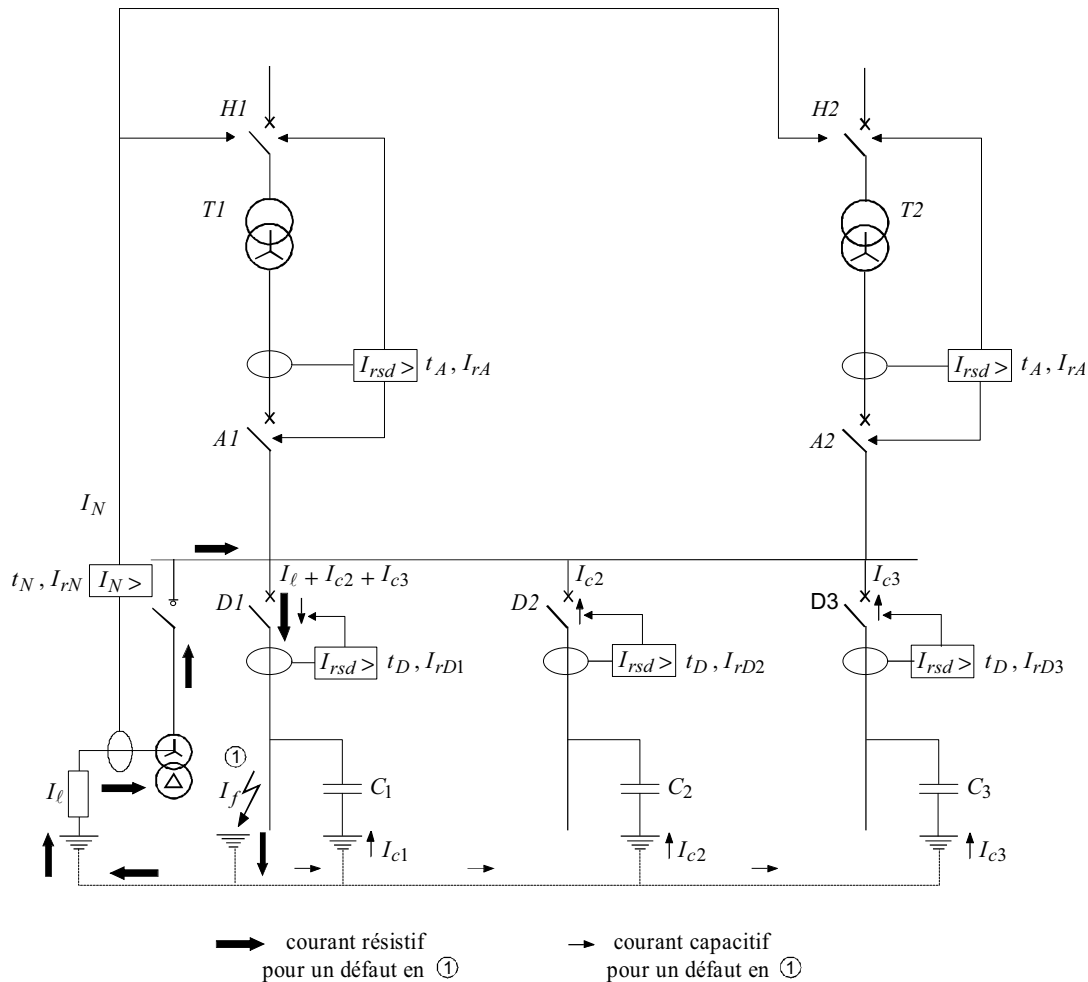


Figure 2-60 : point neutre artificiel sur le jeu de barres principal

2.12.4.3. Dispositifs de protection

La protection contre les défauts d'isolement est assurée par des dispositifs différentiels mesurant les courants résiduels s'écoulant à la terre. Le principe de mise en oeuvre de ces dispositifs est exposé en détail dans le paragraphe 10-1-5-2 du *Guide de protection des réseaux industriels*, à titre d'exemple, on donne figure 2-61 le détail des protections à installer sur un réseau équipé de deux transformateurs fonctionnant en parallèle et d'un générateur homopolaire raccordé sur le jeu de barres principal.



- I_{ci} : courant capacitif se refermant par le départ i
- I_l : courant limité se refermant par la résistance de mise à la terre du point neutre
- I_{rDi} : seuil de réglage du dispositif de protection installé sur le départ i , $I_{rDi} \geq 1,3 I_{ci}$
- I_{rN} : seuil de réglage du dispositif de protection installé sur la résistance de mise à la terre du point neutre, $I_{rN} \geq 1,25 I_{rDi} \max i$
- t_D : temporisation associée aux dispositifs de protection installés sur les départs, la valeur de t_D est choisie de manière à assurer la sélectivité avec les dispositifs de protection aval
- t_A : temporisation associée aux dispositifs de protection installés sur les arrivées, t_A est indépendant de t_D
- t_N : temporisation associée aux dispositifs de protection installé sur la résistance de mise à la terre du point neutre, $t_N \geq t_D + \Delta t$ avec Δt de l'ordre de 300 ms;

Figure 2-61 : protection contre les défauts à terre - cas de deux transformateurs fonctionnant en parallèle

2.12.5. Mise en oeuvre du neutre isolé

2.12.5.1. Non coupure au 1er défaut

Avec un neutre isolé, il est admis de ne pas couper lors d'un premier défaut d'isolement. Cette possibilité nécessite que les conditions suivantes soient remplies :

- dans les schémas *ITN* et *ITS* , la résistance de la prise de terre des masses de l'installation doit être au plus égale à :

$$r_A \leq \frac{U_L}{I_f}$$

I_f est le courant qui circule dans la prise de terre des masses lors d'un premier défaut d'isolement, il est égal au courant capacitif qui se referme par les phases saines du réseau .

$$I_f = I_C = 3 C \omega V$$

- dans le schéma *ITR* , toute tension de contact qui se développe lors d'un premier défaut d'isolement doit être inférieure à U_L
- un dispositif de surveillance permanente de l'isolement doit signaler l'apparition d'un premier défaut d'isolement dans l'installation.
Ce dispositif doit actionner un signal sonore ou visuel ou les deux pour permettre la recherche et l'élimination rapide du défaut.
- la coupure est obligatoire dès l'apparition d'un deuxième défaut d'isolement. Il est recommandé d'avoir recours à des protections à maximum de courant résiduel pour la détection et l'élimination du deuxième défaut. Il n'est pas judicieux d'appliquer le principe retenu pour l'*IT* basse tension consistant à vérifier le fonctionnement des dispositifs de protection contre les défauts entre phase dans les configurations de double défaut. En effet, il est difficilement applicable en haute tension. L'utilisation de protections à maximum de courant résiduel permet dans tous les cas une mise en oeuvre aisée.

2.12.5.2. Coupure au premier défaut

La coupure au premier défaut peut être actionné par le dispositif de surveillance de l'isolement. On assiste alors à une coupure générale de l'installation. La réalisation d'un système de protection sélectif est complexe, elle nécessite l'utilisation de protections directionnelles dont la mise en oeuvre dans un réseau à neutre isolé est souvent délicate (voir § 10.1.4.2., 10.1.5.2. et 10.1.6.2. du *Guide de protection des réseaux industriels*).

Lorsque l'on souhaite la coupure au premier défaut d'isolement, l'utilisation du neutre isolé n'est pas justifiée, il est toujours préférable d'avoir recours à une mise à la terre du neutre par résistance avec une limitation du courant à moins de 20 A permettant l'utilisation de protections simples.

2.12.5.3. Surveillance de l'isolement

Elle peut être effectuée par une protection à maximum de tension résiduelle ou un contrôleur d'isolement.

■ surveillance de l'isolement par une protection à maximum de tension résiduelle (voir § 7.16. du *Guide de protection des réseaux industriels*)

Elle détecte une élévation du potentiel du point neutre, caractéristique d'un défaut à la terre.

■ surveillance de l'isolement par un contrôleur d'isolement

Le contrôleur d'isolement applique une tension continue entre le neutre et la terre, ou entre une phase et la terre si le neutre n'est pas accessible. En cas de défaut d'isolement, un courant continu de fuite s'établit et une alarme est générée.

Le contrôleur est connectée au réseau par l'intermédiaire de transformateurs de tension.

Dans le cas d'un neutre accessible, il est branché au primaire du transformateur de tension raccordé entre le point neutre et la terre (voir fig. 2-62).

Dans le cas d'un neutre non accessible, il est branché au primaire, sur le point neutre de trois transformateurs de tension (voir fig. 2-63).

Une platine standard est branchée en parallèle, elle comprend :

- un condensateur permettant de fixer à la terre le potentiel du neutre des transformateurs de tension sans shunter le courant continu injecté par le contrôleur
- un limiteur de surtension, permettant d'écouler à la terre les surtensions
- une résistance permettant d'abaisser la tension supportée par le contrôleur.

Nota : tous les transformateurs de tension doivent être chargés pour éviter les phénomènes de ferro-résonance pouvant apparaître sur un réseau à neutre isolé. C'est le rôle des résistances r branchées au secondaire (voir fig. 2-62 et 2-63 et § 5.1.2.2.).

Dans le cas où il existe d'autres transformateurs de tension montés en étoile dans le même réseau, il est nécessaire d'installer (voir fig. 2-63) :

- un condensateur entre le neutre des transformateurs de tension et la terre, afin que le contrôleur d'isolement ne débite pas un courant continu permanent par l'intermédiaire de ces transformateurs. La valeur recommandée du condensateur est de $2,5 \mu F \cdot 1600 V_{cc}$.
- un limiteur de surtension permettant d'écouler les surtensions à la terre, un cardew modèle 250 V est conseillé.

Lorsque deux réseaux possédant un contrôleur d'isolement peuvent être couplés, il est nécessaire de réaliser une logique pour que les deux contrôleurs ne puissent pas fonctionner en parallèle.

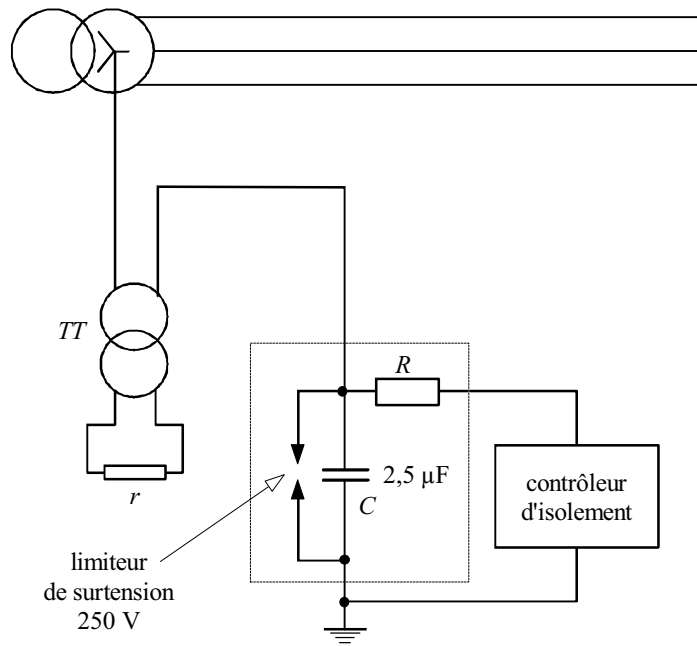


Figure 2-62 : installation d'un contrôleur d'isolement dans le cas d'un neutre accessible

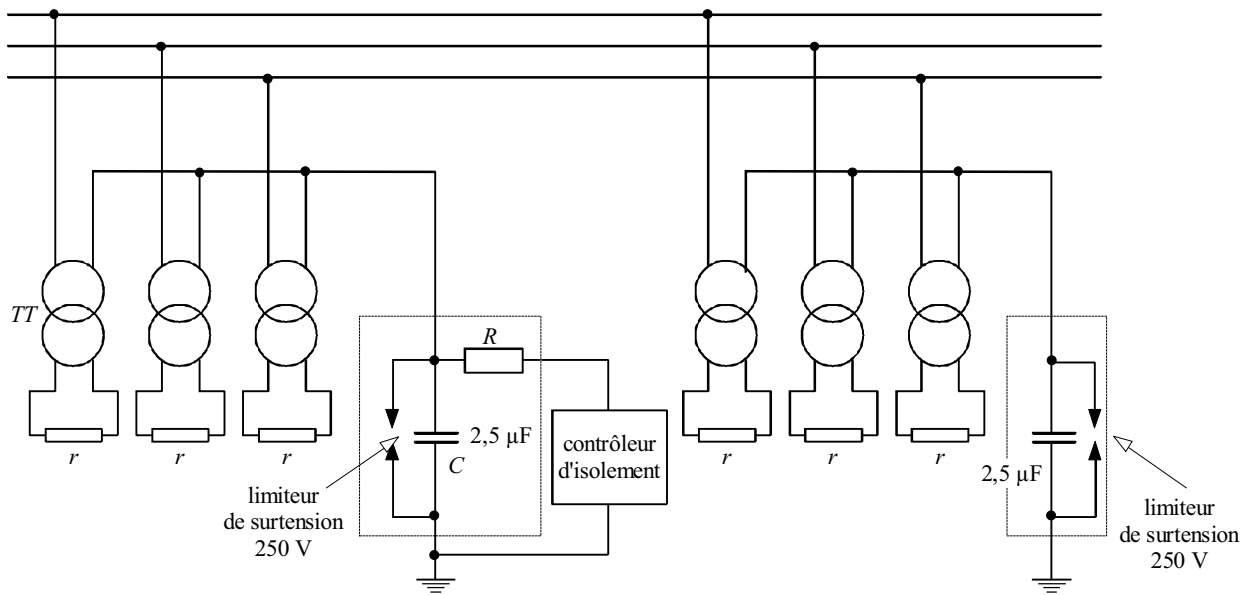


Figure 2-63: installation d'un contrôleur d'isolement dans le cas d'un neutre non accessible

2.12.5.4. Recherche du premier défaut d'isolement

Elle peut être effectuée :

- soit par un système de sélectivité performant (voir § 10.1.4.2., 10.1.5.2. et 10.1.6.2. du *Guide de protection des réseaux industriels*). Il nécessite, comme précisé précédemment, dans la majorité des cas, l'utilisation de protections à maximum de courant résiduel directionnel dont la mise en oeuvre est délicate
- soit par un déclenchement successif de chaque départ jusqu'à ce que le défaut disparaisse. Cette dernière solution est déconseillée car elle entraîne des coupures sur des départs sains et peut être préjudiciable aux conditions d'exploitation.

2.13. Principes de réalisation d'un système de mise à la terre (voir fig. 2-64)

Les trois principales fonctions assurées par un système de mise à la terre sont :

- la protection des personnes
- la réduction des effets des perturbations électromagnétiques
- la réduction des surtensions par rapport à la terre (surtensions de mode commun).

La protection des personnes est notamment assurée par l'interconnexion et le raccordement à la terre des masses des récepteurs conformément aux principes établis pour les schémas *IT*, *TT* et *TN* .

La réduction des effets des perturbations électromagnétiques et la limitation des surtensions de mode commun conduit à la recherche de l'équipotentialité de l'ensemble des masses de l'installation.

Dans une installation sont considérés comme masses :

- les enveloppes châssis et carcasses des équipements électriques et des récepteurs
- les écrans et armures des câbles
- les supports de câbles
- les tuyauteries
- les structures métalliques des bâtiments.

Concernant la réduction des effets des perturbations électromagnétiques, on retiendra les principes de mise en oeuvre suivants :

- pour la réduction des effets des perturbations à basse fréquence (inférieure à 1 000 Hz) :
 - . séparation des câbles de contrôle et des câbles de puissance en les espaçant ou en utilisant des parcours différents (voir § 5-7 du *Guide des protections*).
 - . installation des câbles de contrôle à l'intérieur de goulottes métalliques mises régulièrement à la terre.
 - . installation des câbles de puissance en trèfle, éviter les dispositions en nappe.
 - . éviter le cheminement des câbles de contrôle parallèlement aux câbles de puissance.
 - . toute boucle formée par les circuits doit être évitée.
 - . utiliser une configuration radiale pour la distribution des alimentations auxiliaires, le mode de distribution en boucle doit être évité.
 - . la protection de deux circuits différents par le même dispositif de protection doit être évitée.
 - . tous les conducteurs d'un même circuit de contrôle ou de commande doivent être situés dans le même câble. Quand il est nécessaire d'utiliser des câbles différents, ils doivent suivre le même parcours.
 - . les câbles torsadés sont recommandés pour les signaux de faible niveau.

- Pour la réduction des effets des perturbations à haute fréquence :
 - . tendre vers l'équipotentialité du système.
 - . supprimer les boucles pouvant être créées par les conducteurs de protection et les écrans des câbles.
 - . mettre en place un système de protection contre la foudre.
 - . utiliser des câbles de contrôle blindés :
 - les écrans doivent être continus.
 - les écrans doivent avoir une faible résistance et une faible impédance de couplage écran-conducteurs.
 - tous écrans doit être mis à la terre aux deux extrémités.
 - les mises à la terre des écrans doivent être les plus courtes possible.
 - les écrans doivent être mis à la terre à l'entrée des équipements auxquels ils sont raccordés. Les connexions doivent être de préférence circulaires en utilisant des presse-étoupes appropriés.

afin de réduire les surtensions de mode différentiel entre conducteurs différents, les câbles de contrôle doivent être groupés. Les conducteurs d'un même circuit de contrôle ou de commande doivent être groupés dans un même câble.

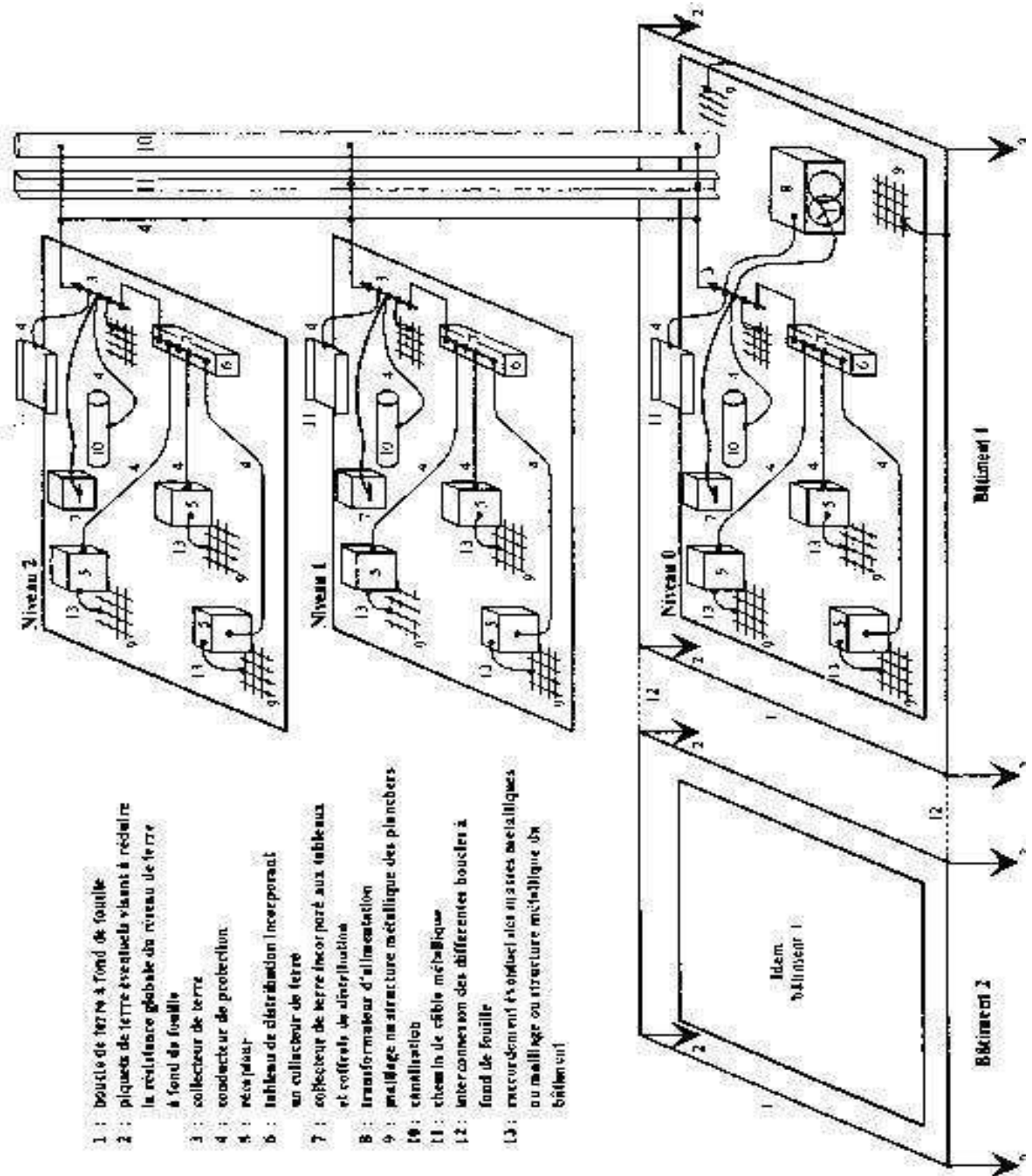


Figure 2-64 : principe de réalisation d'un système de mise à la terre