

Chapitre 8

Protection des biens et des personnes



Dans la prochaine section, nous nous concentrerons sur la protection des biens.
Ceci consiste à protéger le matériel contre les **sur-intensités** et les **courts-circuits**.

Dans les sections suivantes, nous traiterons de la protection des personnes, en appliquant les précautions nécessaires face aux **défauts d'isolement**.

À noter que la protection des biens et la protection des personnes sont ici traitées en deux parties distinctes, mais les systèmes de protections industriels et domestiques combinent à la fois protection des humains et protection du matériel.

Un **court-circuit** correspond à une **liaison accidentelle** entre au moins **deux points de potentiels différents**.

Il se caractérise par une élévation forte et soudaine du courant consommé. La chaleur dissipée par le passage de ce courant anormalement fort peut détruire le matériel ou faire fondre les isolants, ce qui aura pour résultat final d'exposer des parties sous tension voir de provoquer des incendies (voire des explosions en milieu hostile).

La **sur-intensité** (ou surcharge) correspond à un fonctionnement anormal du système.

Dans ce cas le courant consommé est légèrement plus élevé que le courant nominal. Son apparition n'est pas brusque, mais il peut durer indéfiniment. Il n'y a pas forcément de danger immédiat (en tout cas, pas instantanément), mais cela peut endommager l'appareil (vieillissement accéléré) et faire chauffer les conducteurs. Dans ce dernier cas, on retrouve un risque d'exposition de conducteurs sous tension et d'incendies.

On va traditionnellement à associer le court-circuit et la sur-intensité dans la protection des biens, puisque ces effets peuvent être destructeurs en l'absence d'humain.

Le **défaut d'isolement** se produit lorsqu'une partie d'appareil se retrouve sous tension alors que ça n'en est pas son usage normal.

On peut penser à un fil d'alimentation d'un appareil électro-ménager, qui se détache et rentre en contact avec la carcasse métallique. Ici par exemple la carcasse se retrouve au potentiel de phase, mais sans qu'il n'y ait obligatoirement de conséquence ...

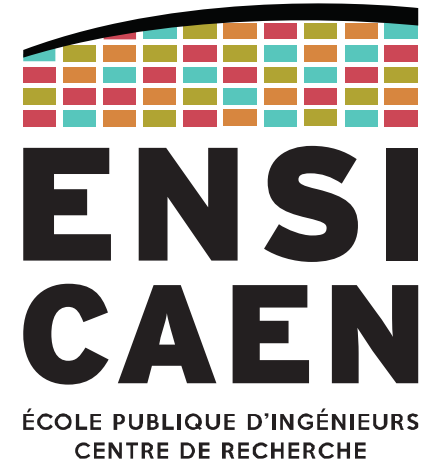
... jusqu'à ce qu'un humain (ou quelconque conducteur) touche cette partie sous tension. Auquel cas un courant va circuler à travers l'humain (ou le conducteur). Selon la résistance, le courant peut être faible ou fort (CC).

Le défaut d'isolement peut donc amener à un **courant de défaut** qui, même faible, peut être fatal pour un humain.

Le défaut d'isolement peut être fatal pour un humain, raison pour laquelle on le catégorise dans la protection des personnes.

Mais il faut noter que le courant de défaut peut être autant destructeur qu'un court-circuit

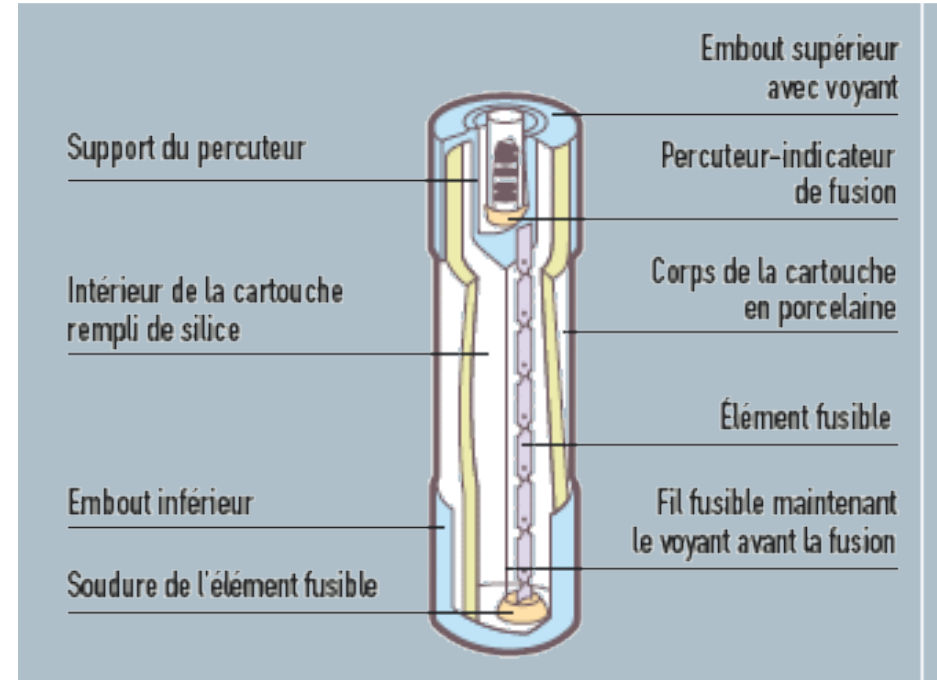
ORGANES DE PROTECTION BT



Fusible

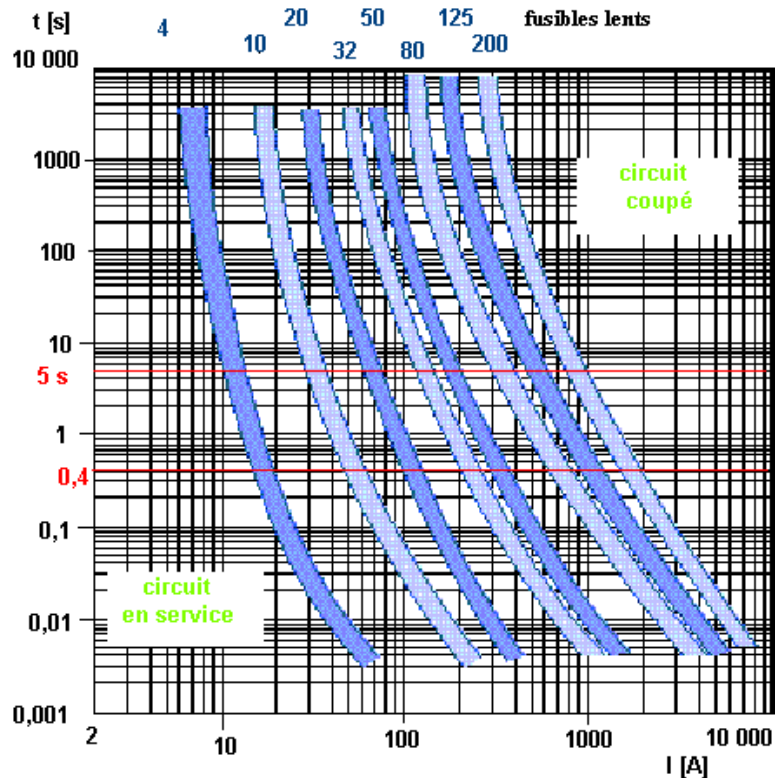
Le fusible est une protection contre les courts-circuits (protection des biens) et est dans certains cas une protection pour les personnes.

Il est remplacé par le disjoncteur, ce dernier étant plus efficace.

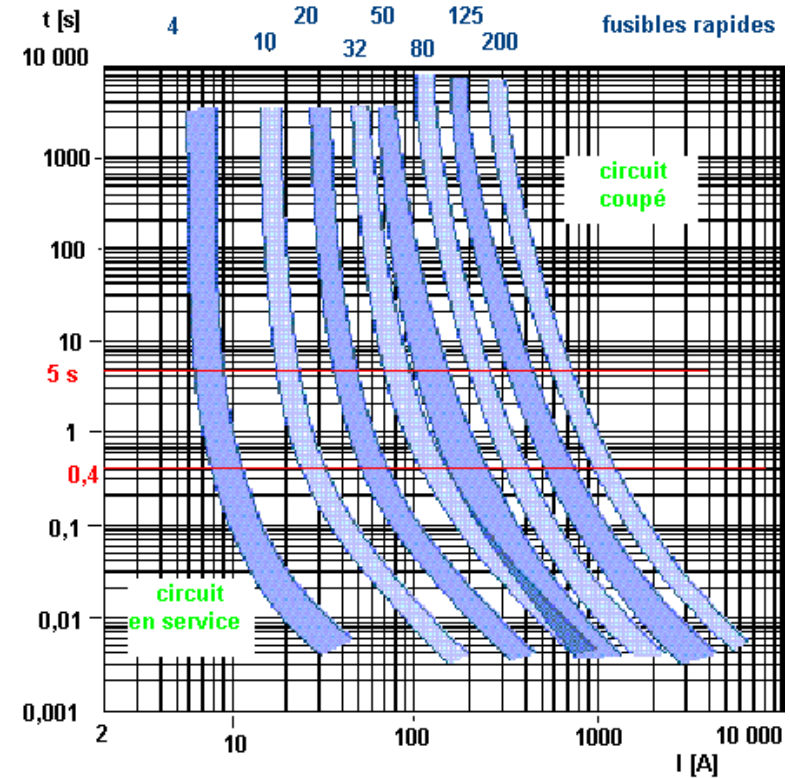


Fusible

En jouant sur les paramètres de fabrication du fusible, il est possible de fixer leur temps de réaction.



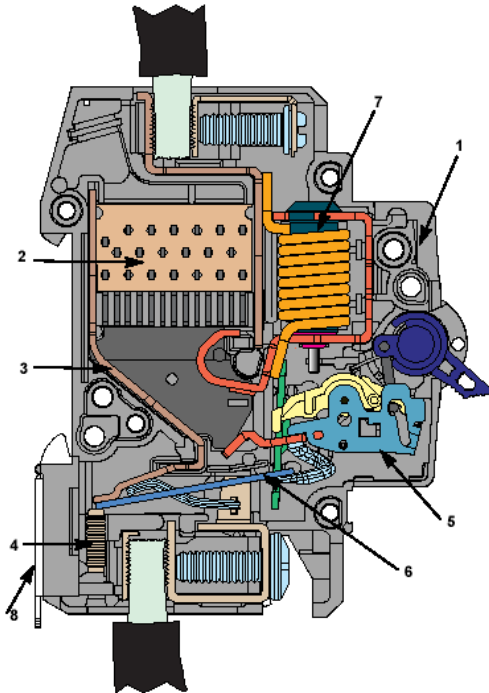
Fusibles lents pour charges inductives.



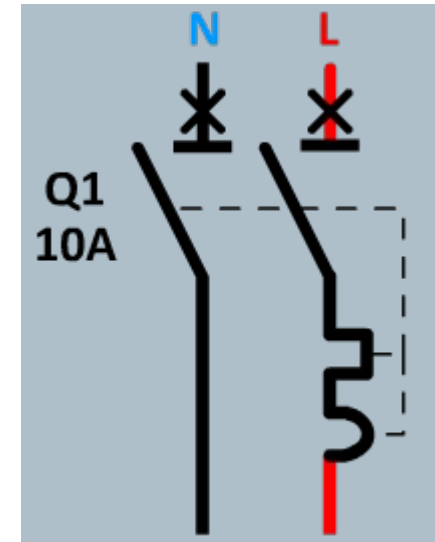
Fusibles rapides pour équipements fragiles.

Disjoncteur magnéto-thermique

Comme le fusible, le disjoncteur protège contre le court-circuit (protection des biens, et des personnes dans certains cas). Il est en revanche plus rapide que le fusible.

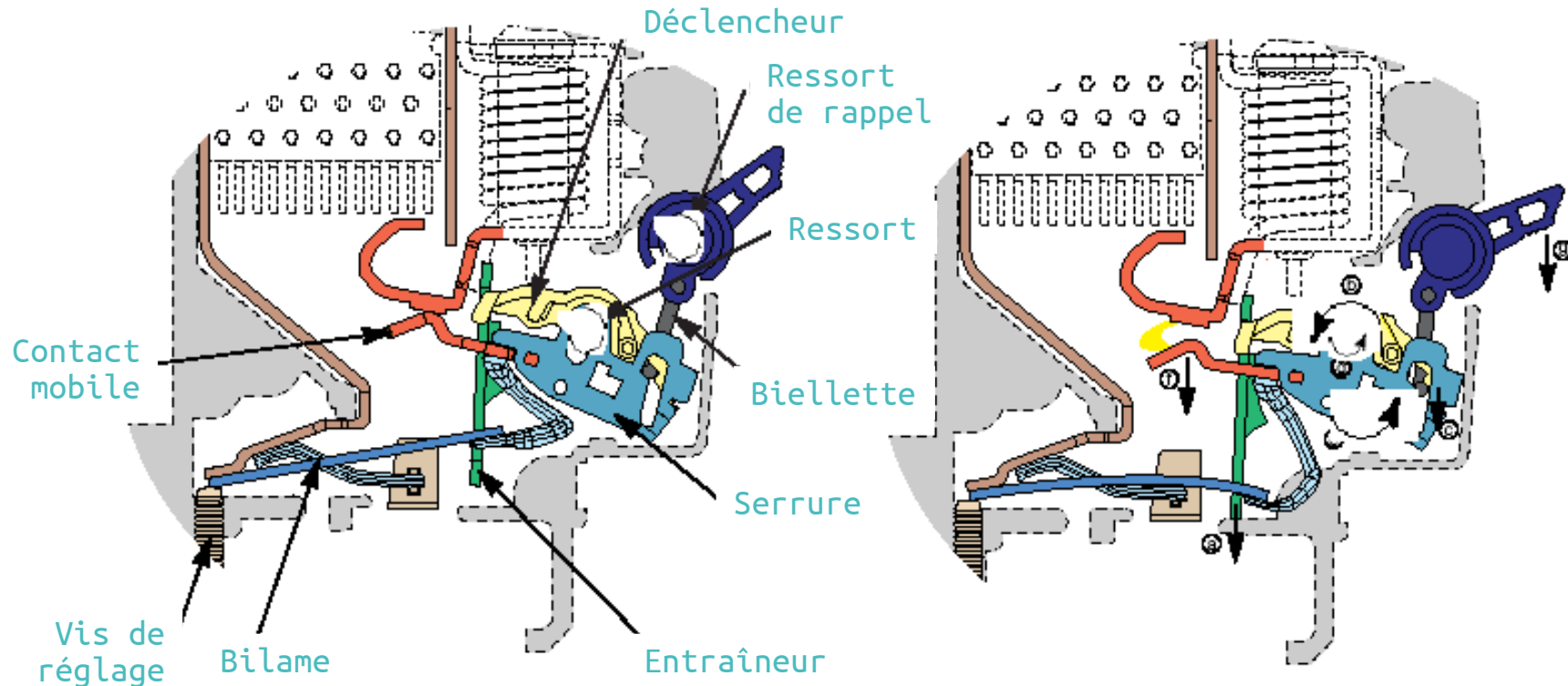


1. Coquille
2. Chambre de coupure de l'arc
3. Tôle d'arc
4. Vis de réglage (temps de réaction)
5. Sous-ensemble serrure
6. Sous-ensemble thermique
7. Sous-ensemble magnétique
8. Ressort et loquet

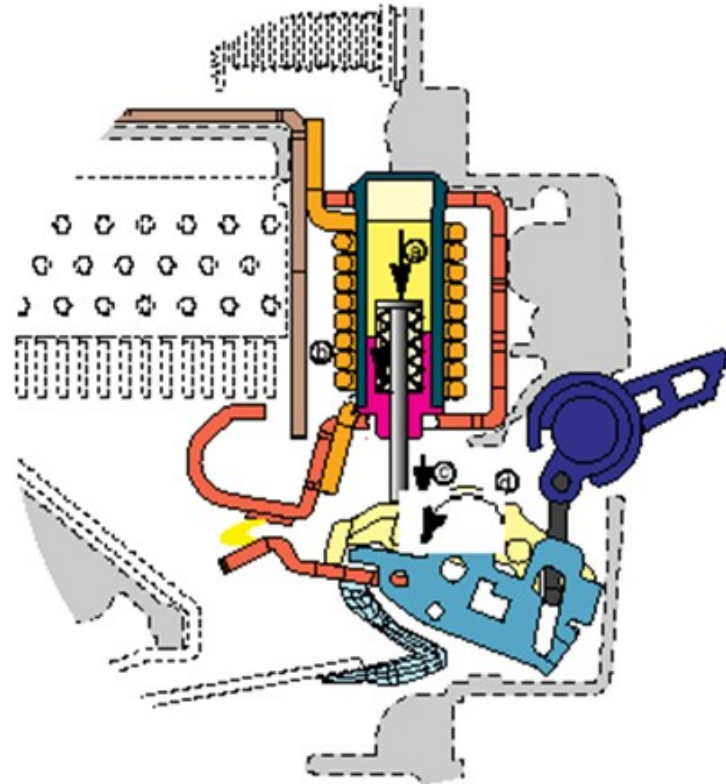
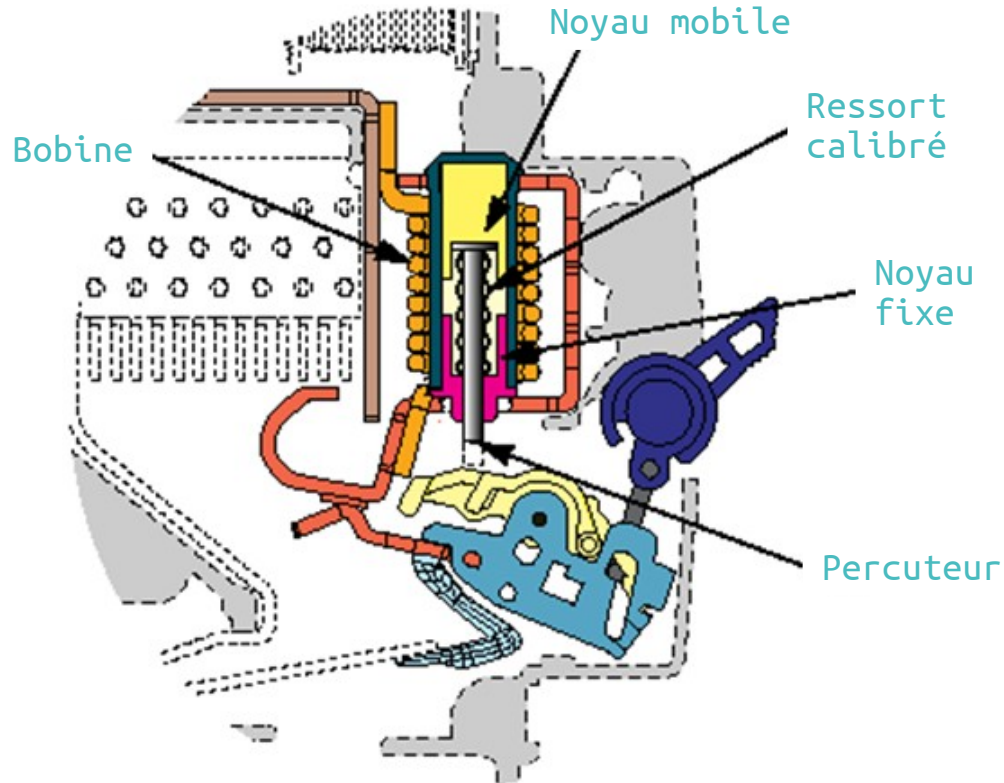


Disjoncteur magnéto-thermique

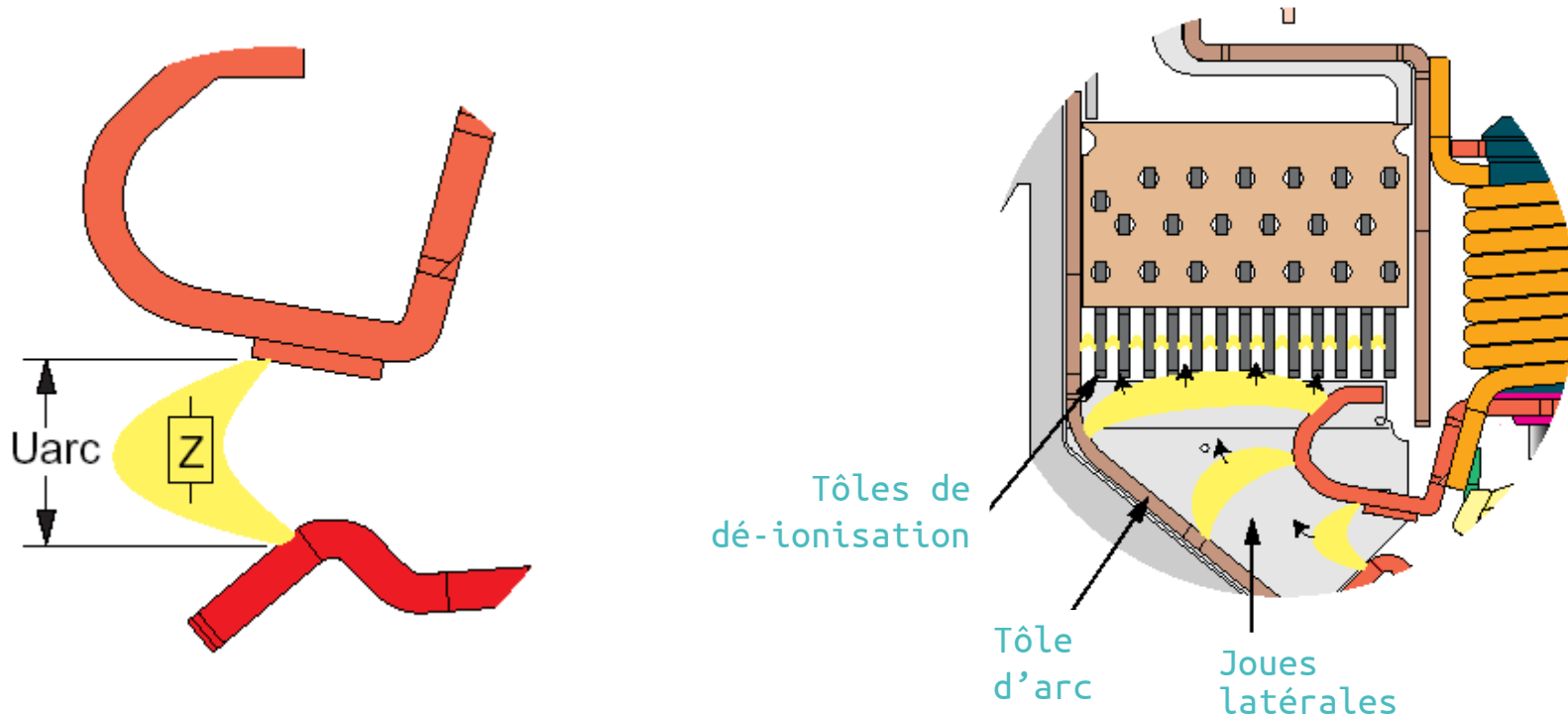
Déclenchement thermique : pour protéger des surcharges prolongées.



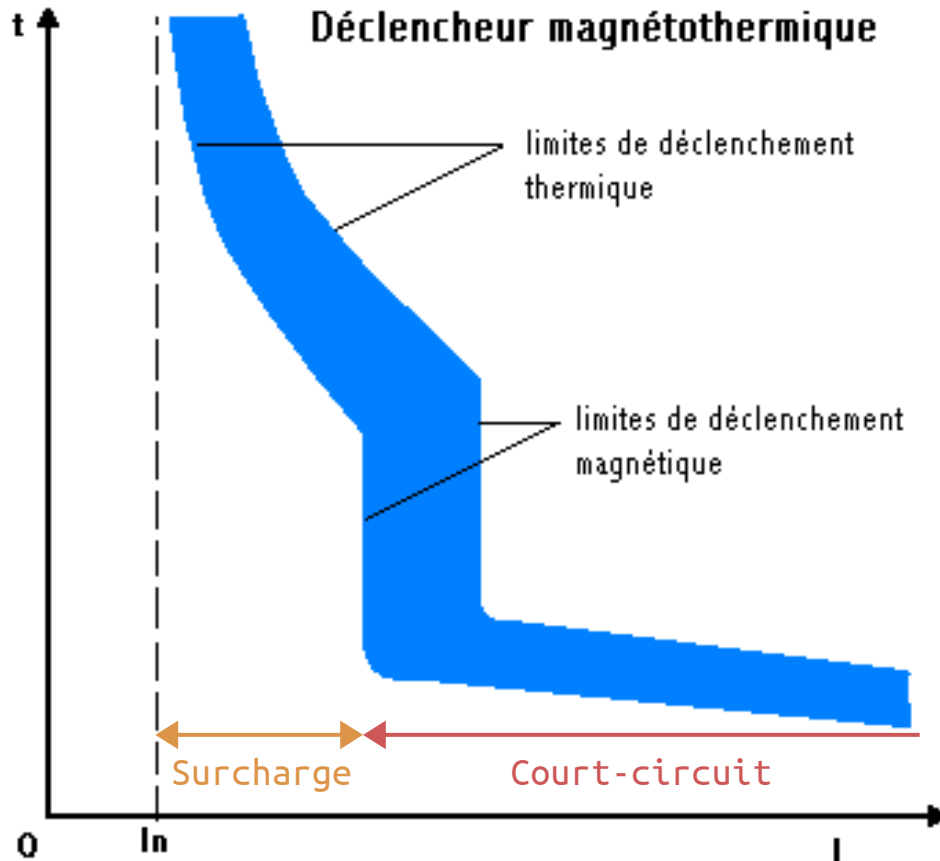
Déclenchement magnétique : pour protéger des courts-circuits francs.



Coupure de l'arc : en soufflant l'arc, on rallonge son chemin et donc sa résistance électrique. Ceci a pour effet de diminuer le courant jusqu'à extinction.



Disjoncteur magnéto-thermique



Le dispositif thermique protège contre les surcharges, le magnétique contre les courts-circuits.

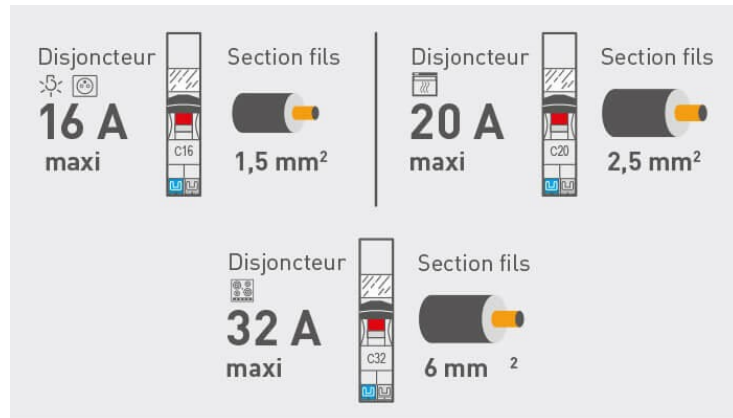
La partie verticale de la caractéristique $I(t)$ correspond au calibre du disjoncteur.

Disjoncteur magnéto-thermique

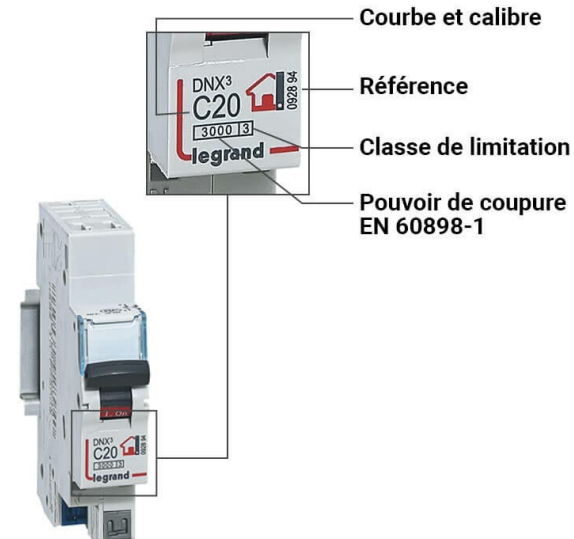
Attention à distinguer le calibre et le pouvoir de coupure du disjoncteur !

Dans les deux cas, ces valeurs sont soumises à la norme NF C 15-100 pour les installations domestiques.

Le **calibre** correspond à la valeur de courant au delà de laquelle le dispositif magnétique se déclenche (partie verticale de la courbe $I(t)$).

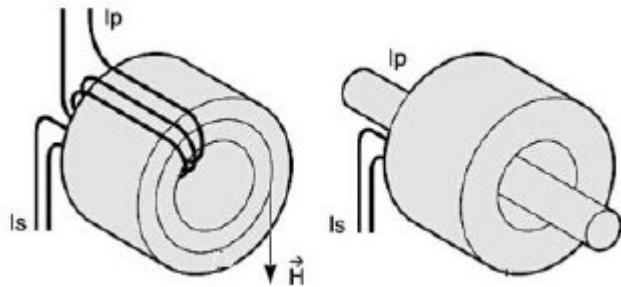


Le **pouvoir de coupure** correspond à l'intensité maximale à laquelle le disjoncteur va assurer sa fonction de coupure du courant.

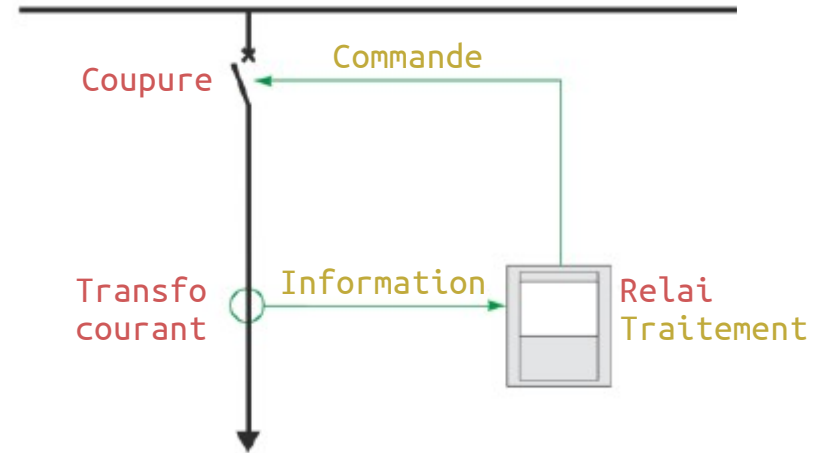


Les disjoncteurs industriels sont quant à eux commandés numériquement.

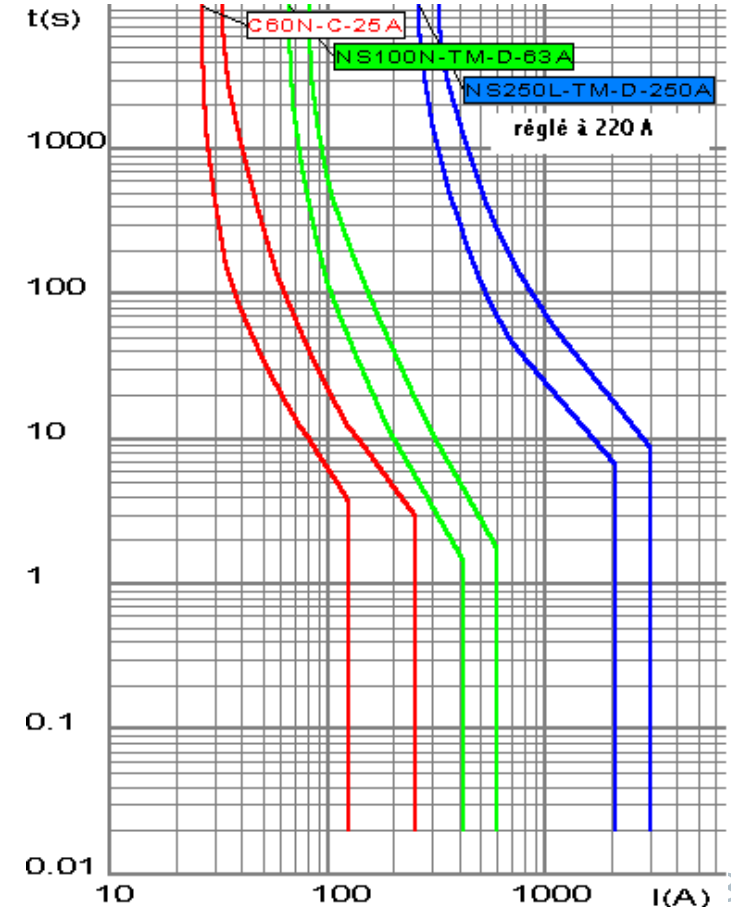
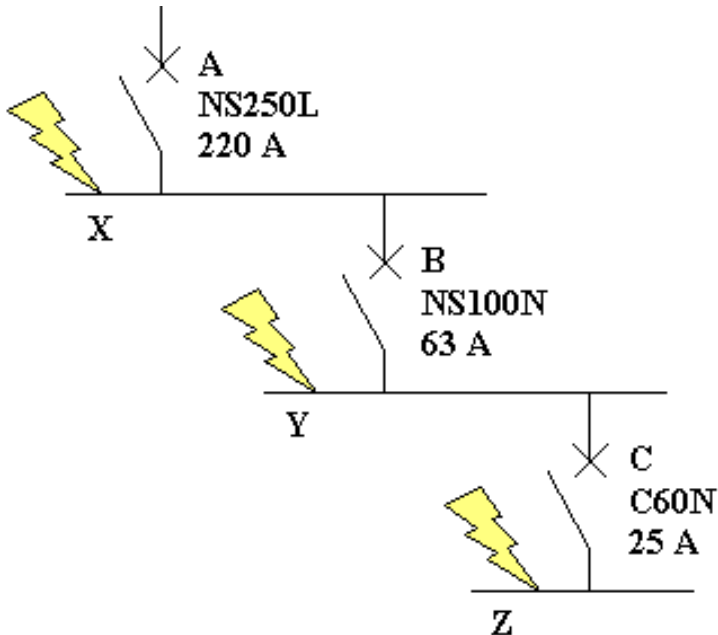
- 1) Le **transformateur de courant** relève l'intensité qui circule dans le fil
- 2) La courbe de déclenchement du **relai** est programmable
- 3) L'**organe de coupure** ouvre le circuit s'il en reçoit l'ordre



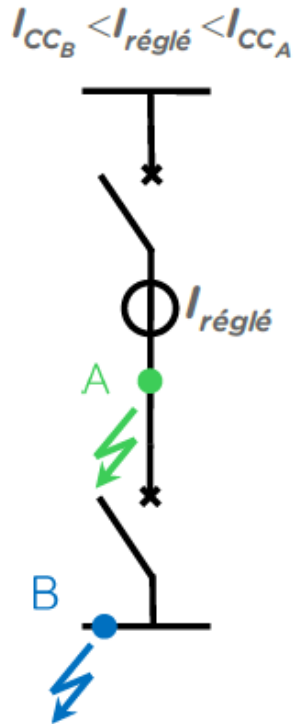
Un transformateur de courant est optimisé pour que le courant secondaire soit proportionnel et en phase avec le courant primaire.



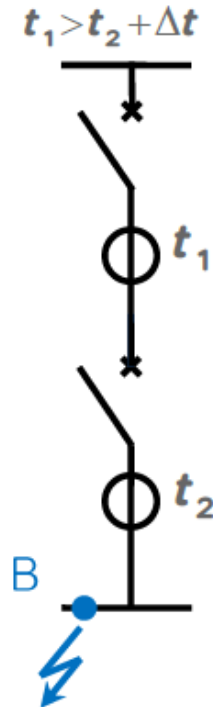
La sélectivité doit être respectée pour couper le réseau au plus près du défaut et ainsi éviter les coupures générales.



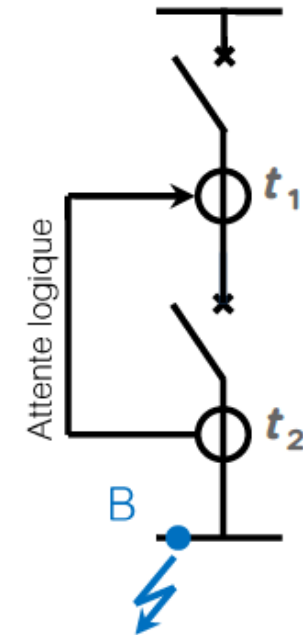
Principes de sélectivité



Sélectivité ampèremétrique

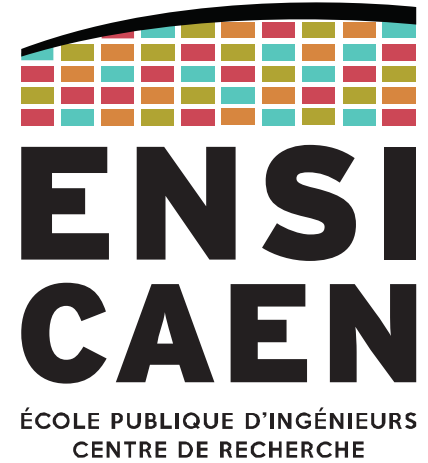


Sélectivité chronométrique



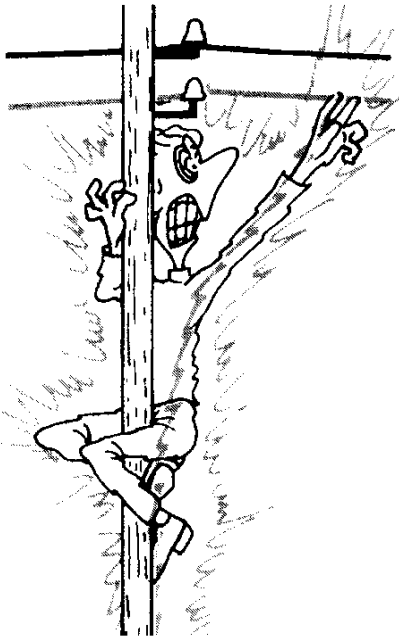
Sélectivité logique

LA PRISE DE TERRE



Contact direct et indirect

Le danger électrique est fourbe : on ne le voit pas, on ne l'entend pas, ...
On recense deux types de contact dangereux avec les circuits électriques.



Contact direct :

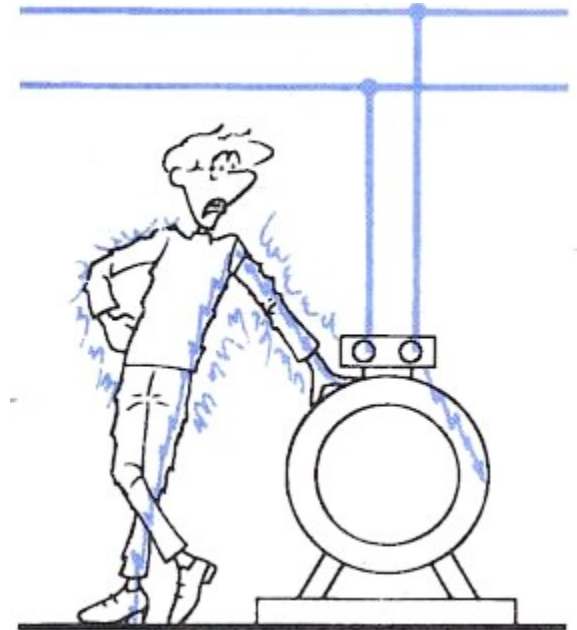
contact d'une personne avec une partie active*
d'un circuit électrique (illustration de gauche).

Contact indirect :

contact d'une personne avec une masse mise
sous tension accidentellement à la suite d'un
défaut d'isolement (illustration de droite).

*Conducteur actif :

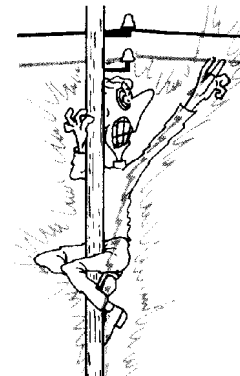
conducteur sous tension en fonctionnement
normal (ligne nue, jeu de barres, ...)



Principales normes : CEI 364 (internationale) et NF C 15-100 (française)

Recommandations pour prévenir le **contact direct** :

- Éloignement ou isolation
- Très Basse Tension (TBT, classe III)



Norme NF EN 61140

Classe	Symbole	Description
0		Isolation simple Interdit en Europe
1		Liaison à la terre pour les parties métalliques
2		Double isolation sans terre
3		Isolation Classe 2 + alimentation par transformateur TBT

Appareils possédant une fiche de terre
(alim PC, machine à laver, radiateur, ...)

Appareils sans fiche de terre
(chargeur téléphone, lampe, tout plastique, ...)

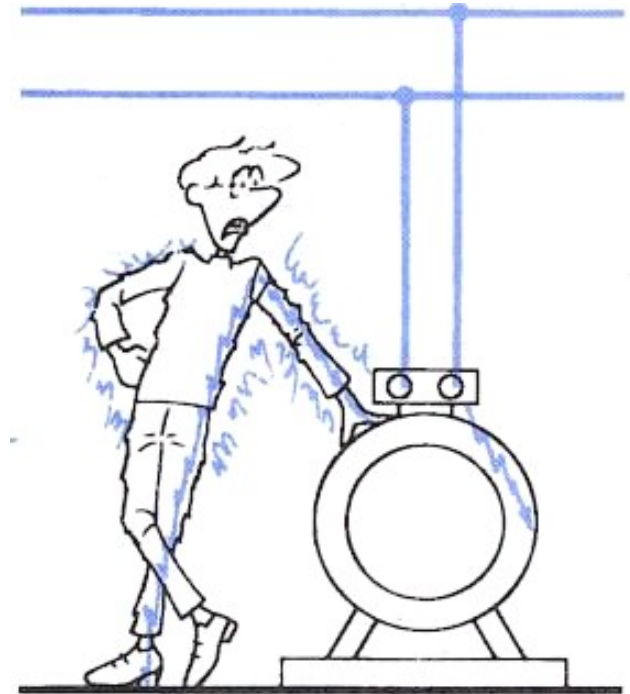
Outillages et appareils portatifs ou en zone humide
(éclairage et prise rasoir en SdB). Max 50 V

Principales normes : CEI 364 (internationale) et NF C 15-100 (française)

Recommandations pour prévenir le **contact indirect** :

- Schéma de Liaison à la Terre (SLT) : TT, TN ou IT
- Masses équipotentielles (mise à la terre ou au neutre)
- Disjoncteur différentiel
- Isolation (classe II)

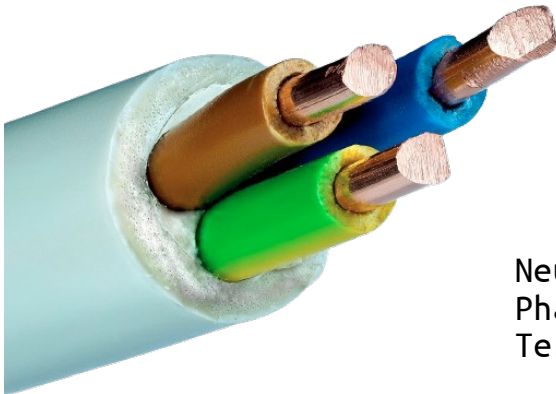
Les trois premiers points se basent sur un conducteur de terre → sujet du chapitre.



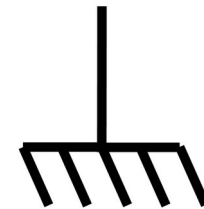
La « **terre** » tient son nom du sol, dans lequel est physiquement branché un conducteur. Le sol est considéré comme un parfait conducteur (sauf sol aride) et par convention **son potentiel est défini à 0 V** (un peu comme le niveau de la mer est l'altitude 0 m).

Il ne doit être confondu ni avec le neutre ni avec la masse :

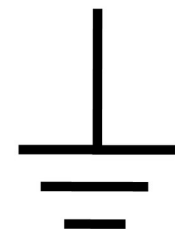
même si par convention tous ces points sont au même potentiel, le fil de terre n'est pas censé transporter d'électricité en fonctionnement normal mais **assure un rôle de sécurité des biens et des personnes**.



Neutre : en bleu
Phase : en rouge, marron ou noir
Terre : en rayé vert-jaune

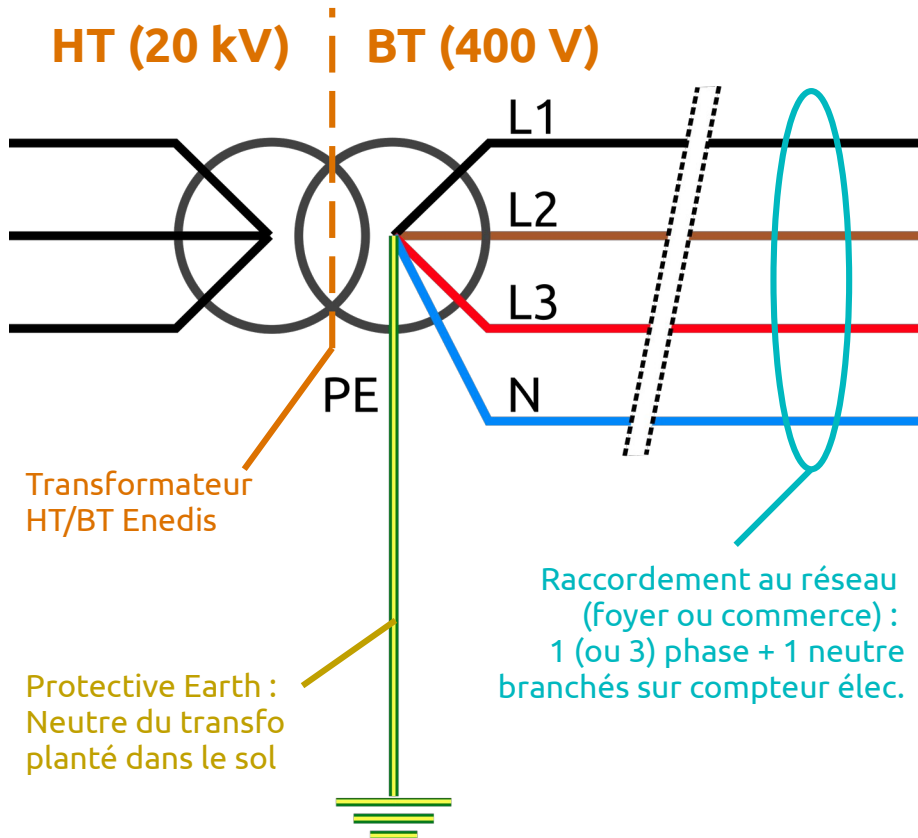


masse



terre

Potentiel de terre – Côté réseau de distribution



Le potentiel de terre est créé par le réseau de distribution.

Côté HT (20 kV), trois conducteurs de phase

Côté BT (400 V), trois conducteurs de phase + 1 conducteur de neutre.

Le neutre est « créé » à partir du point milieu du secondaire du transformateur.

Tous les transformateurs Enedis relient le neutre en sortie du transformateur à la terre (Protective Earth).

Côté installation domestique, toutes les masses sont reliées à la terre : c'est ce qu'on appelle la **liaison équipotentielle**.

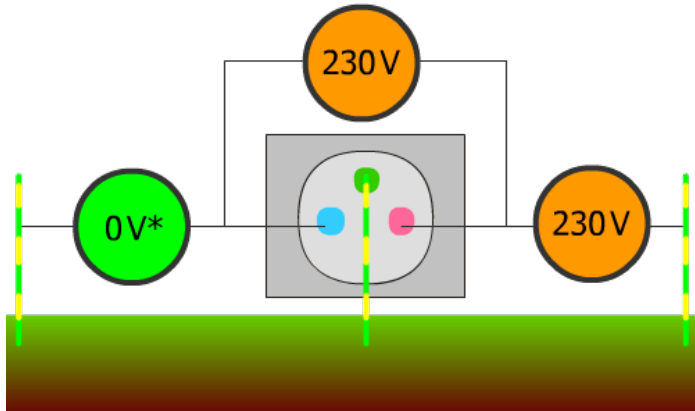
Les masses reliées à la terre comprennent non seulement les carcasses métalliques des appareils électriques, mais également tout ce qui est métallique (chauffage, plomberie, structure du bâtiment, ...).



Comme le neutre est relié à la terre par Enedis, ces deux fils sont au même potentiel.

La terre et le neutre ont donc un potentiel de 0 V.

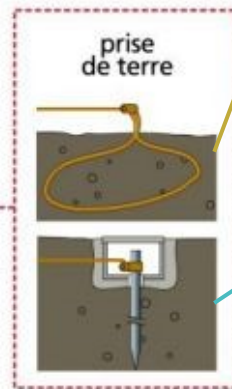
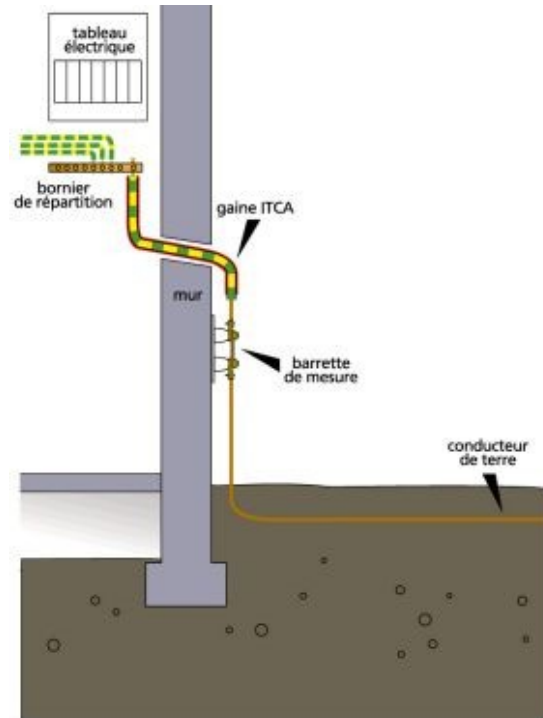
La phase tourne à une tension alternative de 230 V par rapport au neutre et à la terre.



Les tournevis testeur de tension utilisent la terre pour fonctionner. Si la pointe est reliée à la phase, un courant circule à travers le tournevis puis l'utilisateur jusqu'à la terre et allume la LED. Le courant est limité par une résistance de 1 MΩ.

Qualité de la prise de terre

La qualité de la prise de terre joue un rôle essentiel dans la protection des personnes contre le risque électrique, elle ne devra pas dépasser quelques dizaines d'Ohm.



Sortie de tresse pour
branchement au
tableau électrique



Boucle de terre pour
bâtiments récents.

Puits de terre voire
piquet de terre pour
bâtiments anciens.

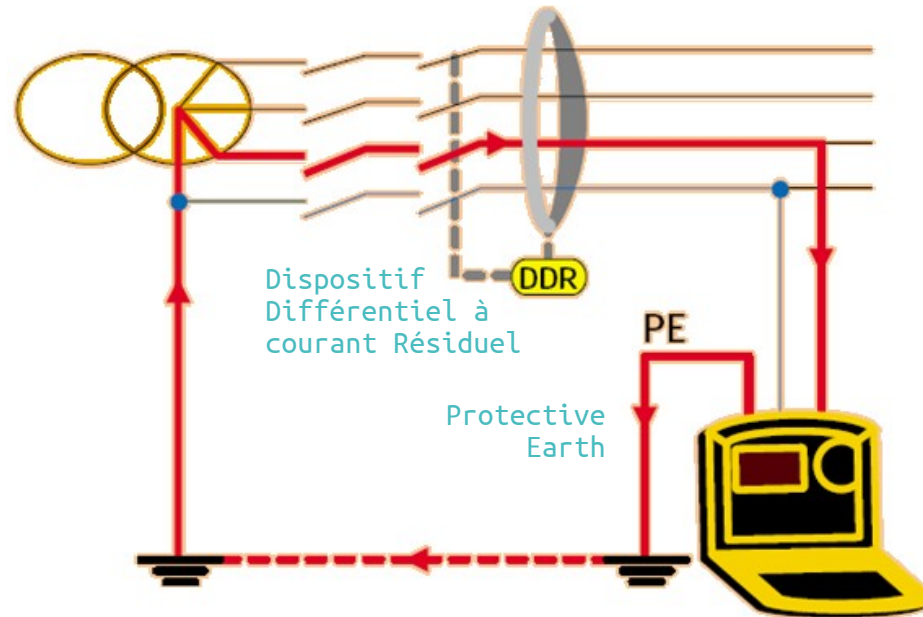


Évidemment la résistance de la prise de terre dépendra de sa forme, de son implantation dans le terrain ainsi que de la nature du sol.

CONSTITUTION DE LA PRISE DE TERRE	NATURE DU TERRAIN		
	ARABLES GRAS REMBLAIS HUMIDES	ARABLES MAIGRES REMBLAIS GROSSIERS	PIERREUX SECS SABLE SEC
MAISON INDIVIDUELLE 8 x 7m • boucle à fond de fouille • 1 piquet vertical de 2 m • 4 piquets verticaux (un à chaque angle) • 1 tranchée de 10 m	Ω 3 à 10	Ω 30 à 60	Ω 100 à 200
IMMEUBLE COLLECTIF 10 x 40 m • boucle à fond de fouille • 10 piquets verticaux de 2 m régulièrement répartis à la périphérie	1 à 3 3 à 8	10 à 20 23 à 45	50 à 100 120 à 220

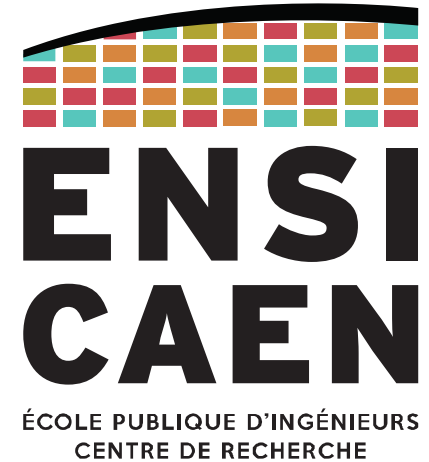
La résistance de terre peut être mesurée avec une « mesure de boucle », en se raccordant tout simplement au réseau d'alimentation.

Comme un ohmmètre classique, l'appareil mesure le courant et en déduit la résistance.



SCHÉMAS DE LIAISON DE MISE À LA TERRE

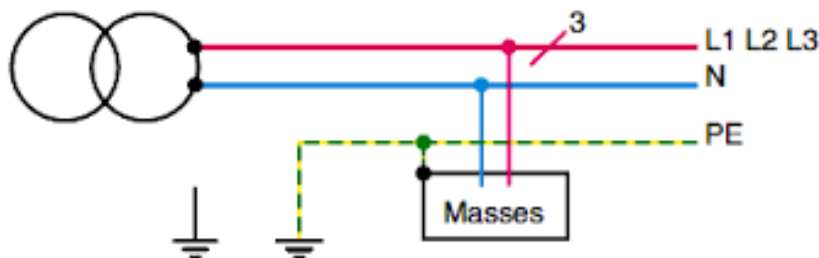
Ou régimes de neutre



Les deux conducteurs mis à la terre

Dans l'installation électrique, la mise à la terre concerne deux conducteurs :

- Le **NEUTRE** du générateur, qui est un **conducteur actif**
- La **MASSE** du récepteur, qui est un **conducteur passif**

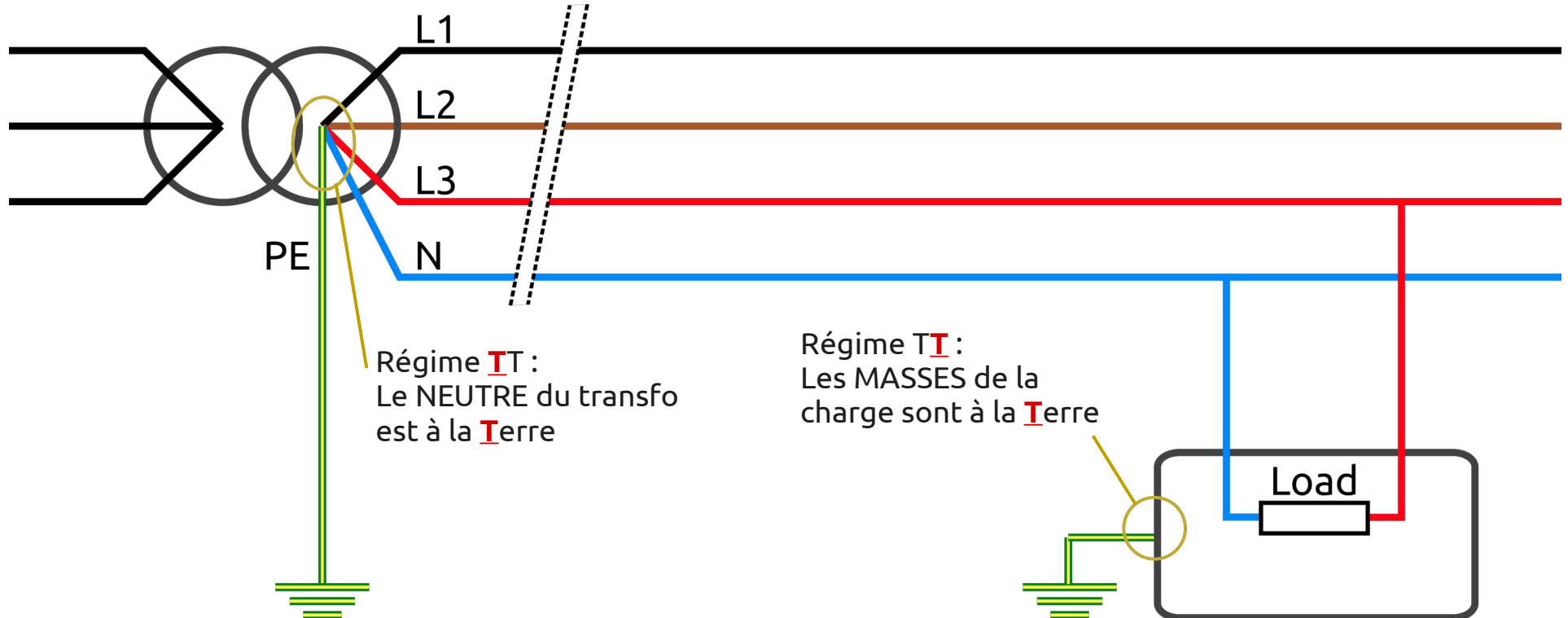


PE :
Protective Earth
(fil de terre)

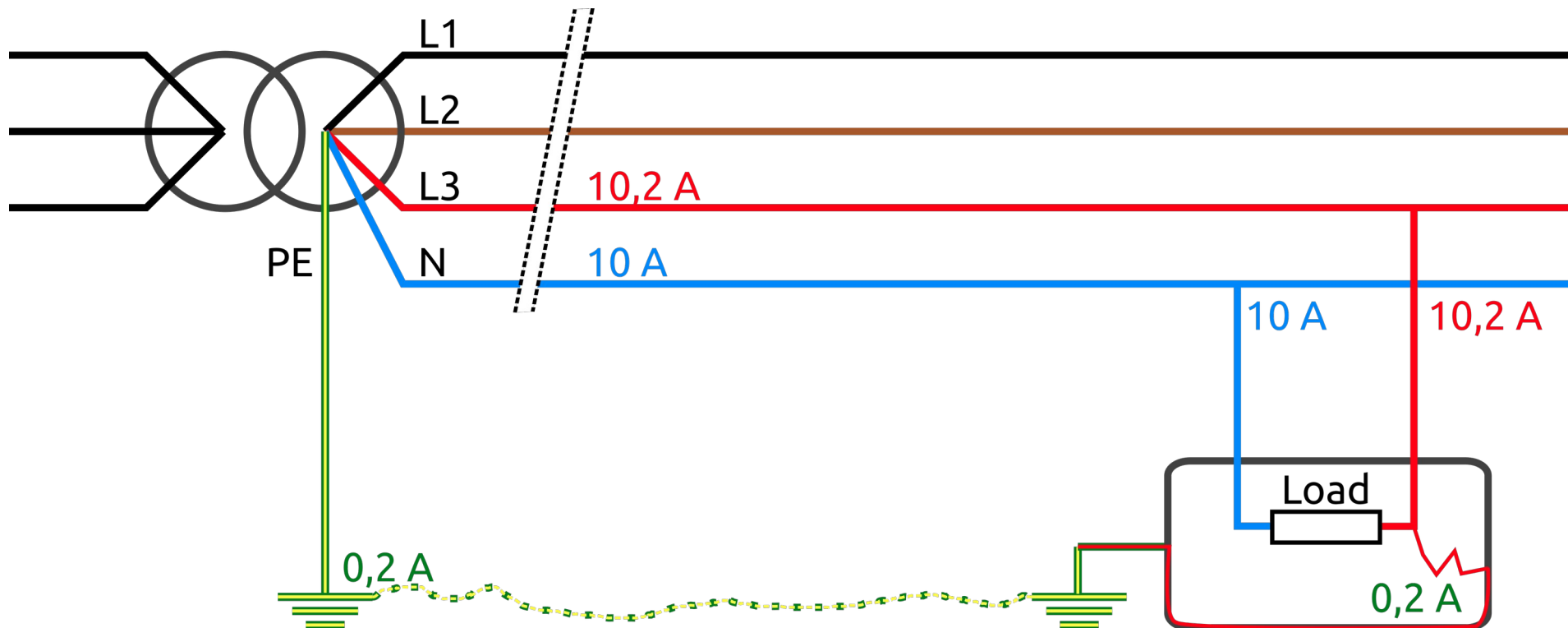
Deux lettres permettent d'identifier Les systèmes de liaison de mise à la terre :

- La première lettre indique la liaison du **NEUTRE** par rapport à la terre
- La deuxième lettre indique la liaison de la **MASSE** par rapport à la terre

Le régime TT est celui le plus largement répandu (hors industries)

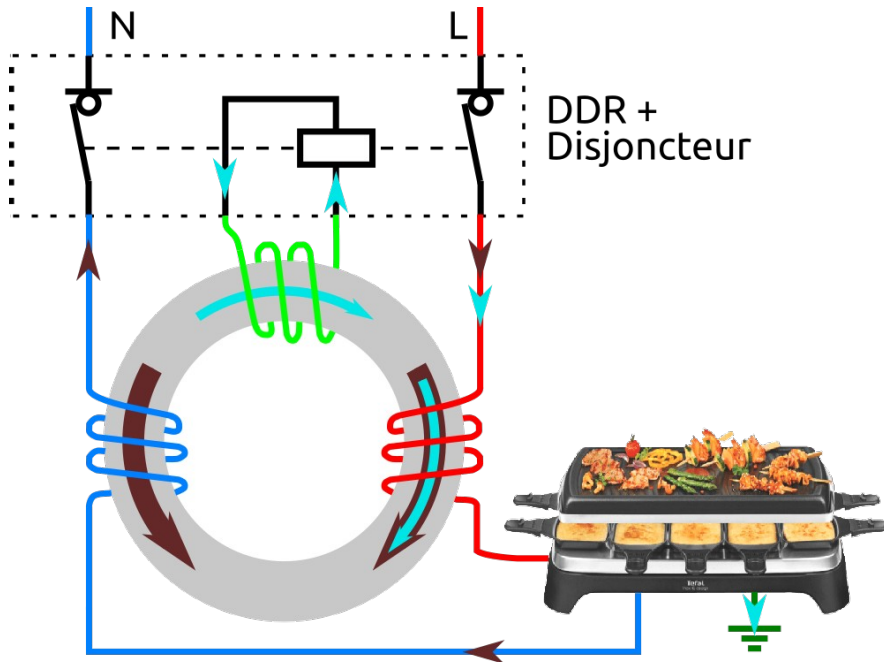


En cas de **défaut d'isolement**, un courant circule dans la terre (dans le sol).



Régime TT – Disjoncteur différentiel

Pour détecter le **défaut d'isolement**, on utilise un **DDR (Dispositif Différentiel à courant Résiduel)**. Associé à un disjoncteur, ils forment ce qu'on appelle vulgairement un **disjoncteur différentiel**.



En temps normal, le tore magnétique voit deux flux magnétiques équilibrés, qui s'annulent au niveau de la bobine de mesure du DDR.

Quand une partie du courant de phase s'évacue par la terre, un déséquilibre magnétique est relevé par le DDR.

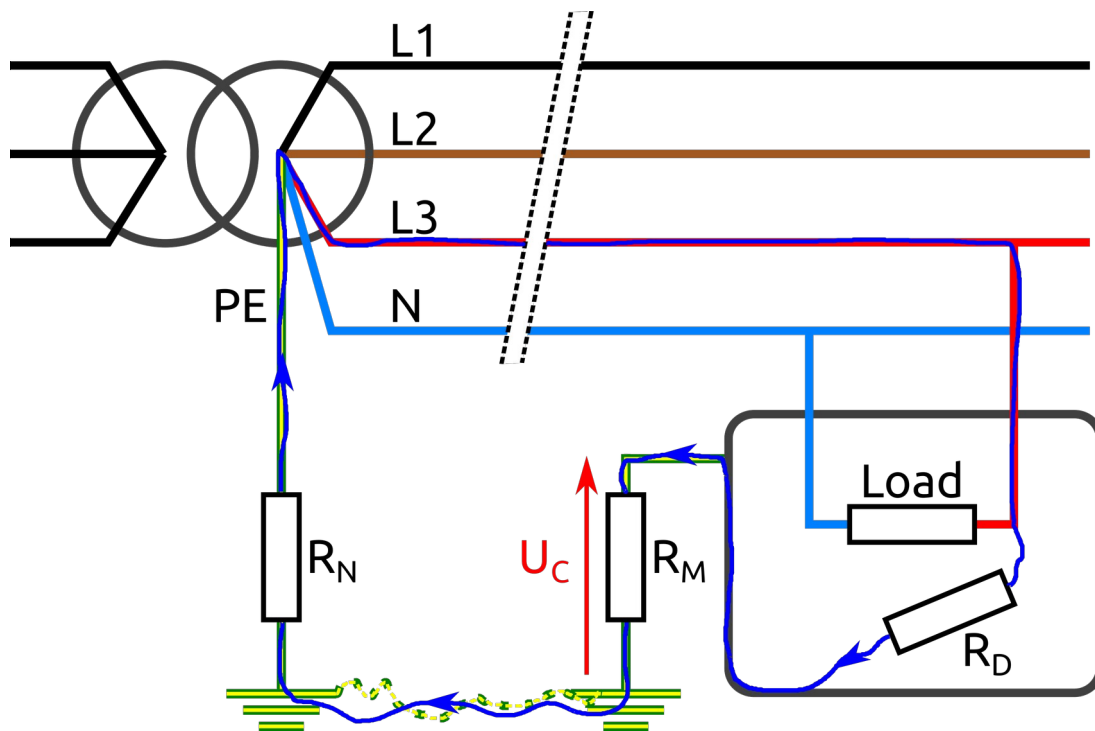
Si ce déséquilibre est trop important, les interrupteurs pilotés par le DDR sont ouverts automatiquement.

La sensibilité du DDR est calculée en fonction de la tension apparue au niveau du défaut.

En électricité domestique, le différentiel général est sensible à 500 mA, les autres à 30 mA.

Régime TT – Tension de contact

La sensibilité du DDR est calculée à partir de la **tension de contact U_c** : c'est la tension que subirait une personne en contact avec les masses métalliques par contact indirect.



R_D : Résistance du défaut (0Ω si court-circuit franc, sinon pas négligeable)

R_M : Résistance des masses métalliques jusqu'à la prise de terre

R_N : Résistance entre le neutre du transfo et la prise de terre

U_c : Tension de contact (ddp masse-terre)

V : Tension simple efficace (230 V)

I_D : Intensité du courant de défaut

Régime TT – Tension de contact

La sensibilité du DDR est calculée à partir de la **tension de contact U_c** : c'est la tension que subirait une personne en contact avec les masses métalliques par contact indirect.

À partir du schéma précédent,
on obtient le courant de défaut :

$$I_D = \frac{V}{R_M + R_N + R_D}$$

Il s'agit du courant mesuré par le DDR

Puis la tension de contact U_c :

$$U_C = I_D \times R_M$$

C'est la tension masse-terre

La norme NF C 15-100 impose une
tension limite U_L à ne pas dépasser :

$$U_C < U_L$$

En local sec : $U_L = 50 \text{ V}$

En local humide : $U_L = 25 \text{ V}$

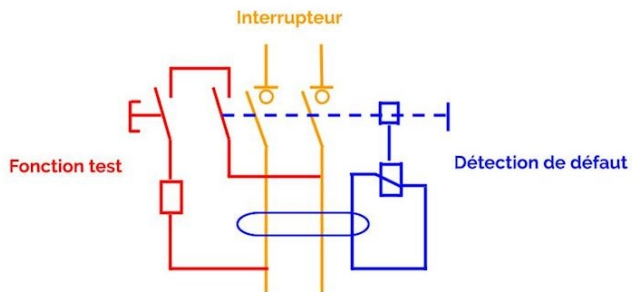
Il faut donc limiter la
sensibilité $I_{\Delta N}$ du DDR à :

$$I_{\Delta N} < \frac{U_L}{R_M}$$

En pratique, un disjoncteur différentiel
se doit de couper pour $0.5 \times I_{\Delta N} \leq I_D \leq I_{\Delta N}$

SCHÉMAS DE LIAISON DE MISE À LA TERRE

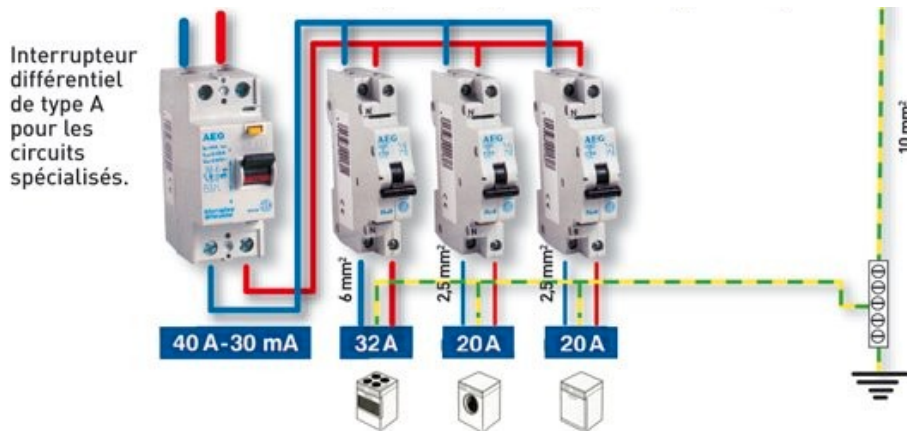
Régime TT – Disjoncteur différentiel



Symbole du disjoncteur différentiel

Disjoncteur différentiel général (500 mA)

Association différentiel et disjoncteurs



Disjoncteur différentiel
domestique 30 mA

Schéma :
DDR, test,
Disj. Magn.-Therm.

Sensibilité :
30 mA

Bouton de
test DDR

Pouvoir de
coupure :
3000 A

Calibre :
16A, courbe C

DDR

Disjoncteur

Dans le cas de sol arides ou rocheux, la résistance de terre n'est plus négligeable et le sol ne peut plus remplir le rôle de conducteur de sécurité.

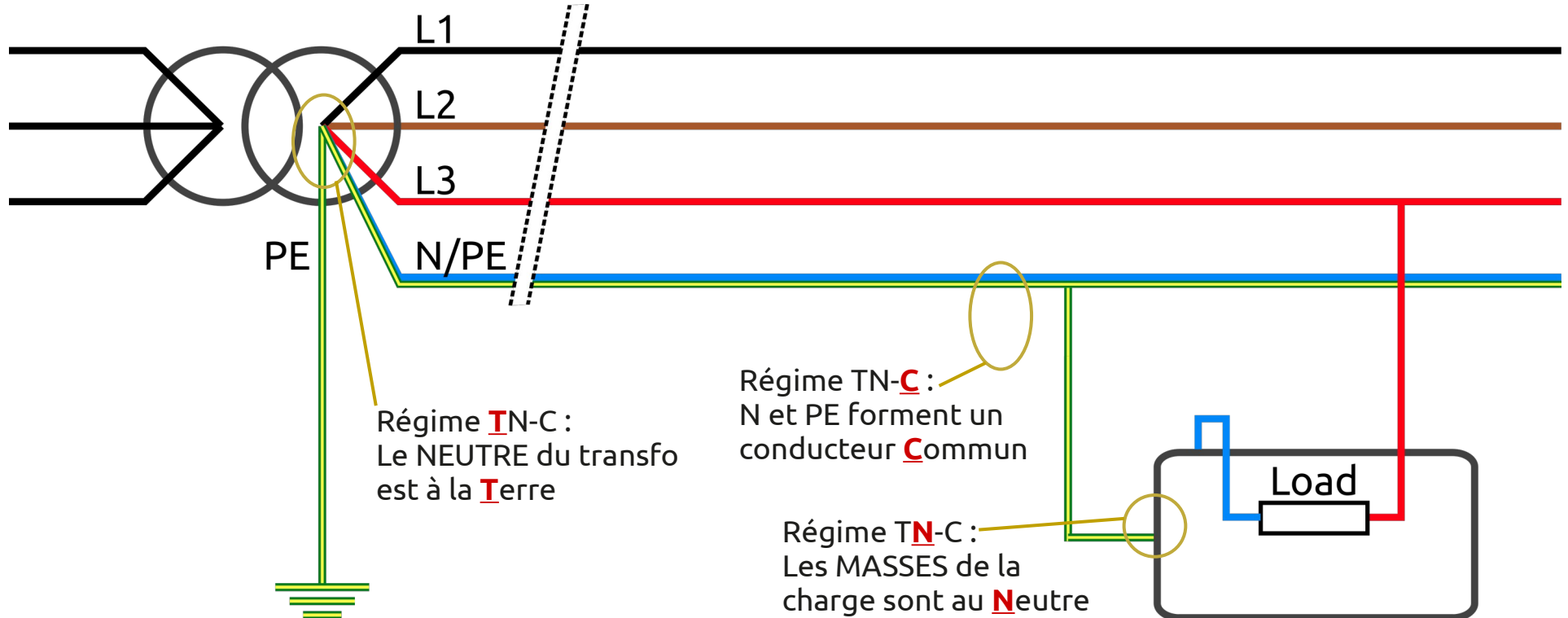
Il est alors possible d'opter pour un régime de neutre TN, qui **transporte un conducteur de terre sur les lignes électriques** au même titre que les phases et le neutre.

Dans le régime **TN-C**, le câble de neutre et le câble de terre sont Communs, il y a donc 4 fils transportés sur cette partie du réseau électrique

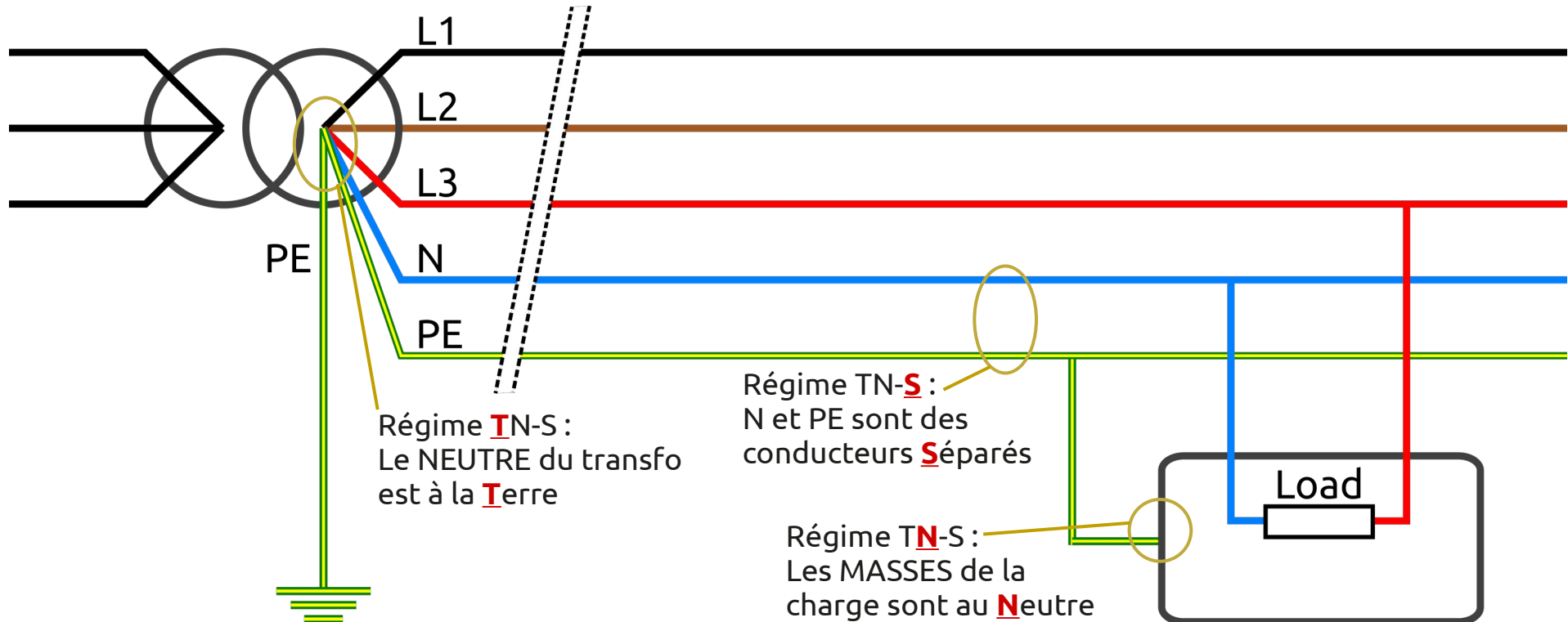
Dans le régime **TN-S**, le câble de neutre et le câble de terre sont Séparés. Il y a donc 5 fils transportés sur cette partie du réseau électrique.

Régime TN-S et TN-C

Le régime TN-C fait apparaître un câble nommé **PEN** (*Protective Earth and Neutral*).



Le régime TN-S utilise un cinquième conducteur sur les lignes de distribution.



Dans le cas du régime TN-C et TN-S, un défaut d'isolement se traduit par l'apparition d'un court-circuit, donc un fort courant circulant dans la phase et le conducteur PEN/PE.

C'est donc la partie magnétique des disjoncteurs qui coupera le circuit et qui protégera les personnes !

Il faudra alors calculer le courant de court-circuit I_{CC} , et s'assurer que celui-ci dépassera toujours le seuil de déclenchement du disjoncteur.

Si ce n'est pas le cas, on peut toujours :

- augmenter la section des conducteurs (R_L et $R_{PE} \searrow$, donc $I_{CC} \nearrow$)
- diminuer le seuil de déclenchement du disjoncteur en utilisant un disjoncteur configurable

Le courant de défaut étant élevé, ce régime est interdit lors des risques d'explosion.

Différences TN-C et TN-S

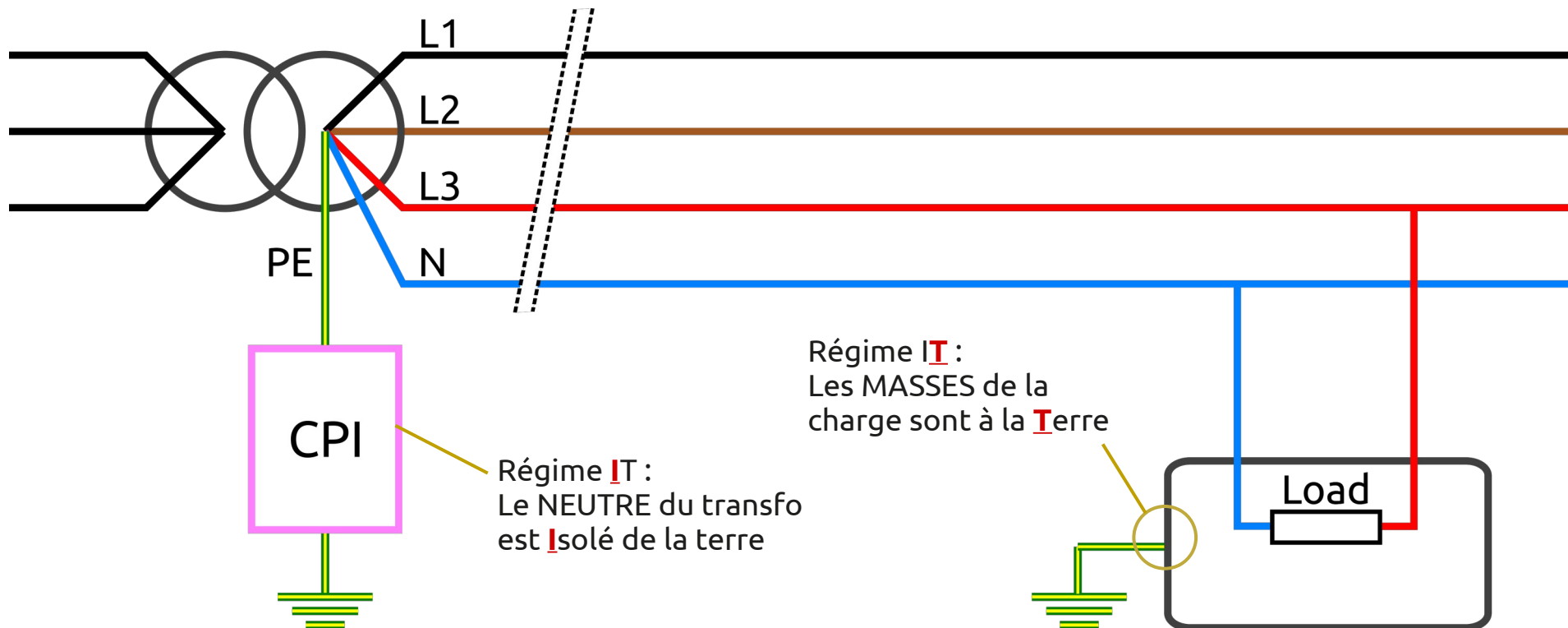
Une installation en TN-S coûte cher puisqu'un nouveau conducteur doit être tiré sur toutes la longueur de transport des lignes électriques.

On ne l'utilise que quand il est impossible d'utiliser le TN-C :

- D'un point de vue légal, il est interdit d'utiliser le TN-C lorsque la section des conducteurs est inférieure à 10 mm² pour du cuivre ou 16 mm² pour de l'aluminium
- Si les câbles sont trop longs en TN-C, la résistance de la ligne augmente et la valeur de courant de court-circuit diminue, augmentant ainsi le temps de déclenchement du dispositif de sécurité

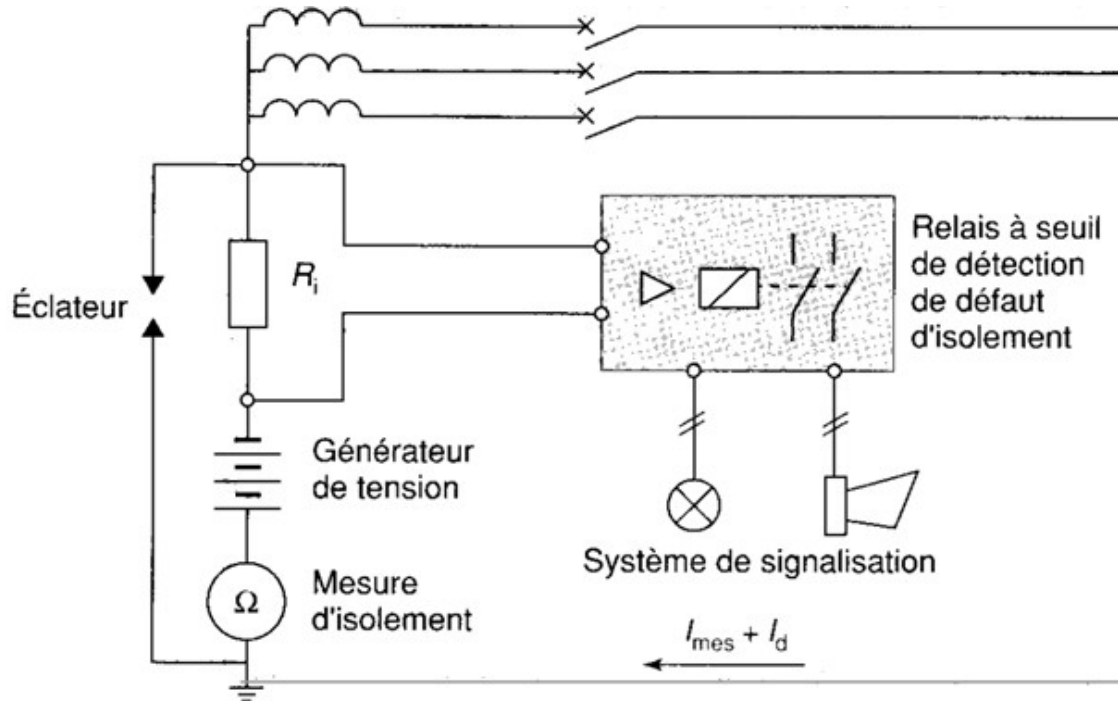
Dans le cas du régime TN-S, il est également possible d'utiliser un DDR si les câbles sont longs. Mais le bon calibrage du disjoncteur magnétique reste de mise.

En régime IT, le neutre du transformateur est **artificiellement isolé de la terre**.



Régime IT - CPI

Le **CPI (Contrôleur Permanent d'Isolément)** mesure la résistance entre le neutre du transfo et la terre. Pour cela, il impose une tension continue aux bornes de cette résistance et mesure le courant qui y circule.



Valeur de la
résistance
d'isolement

Réglage
du seuil



Régime IT – Défauts

En cas d'un premier défaut d'isolement (ex : Ph1 et masse)

- Courant de défaut et tension de contact faibles (car forte résistance neutre-terre) → absence de danger
- Aucun déclenchement n'est donc nécessaire, mais la signalisation est obligatoire

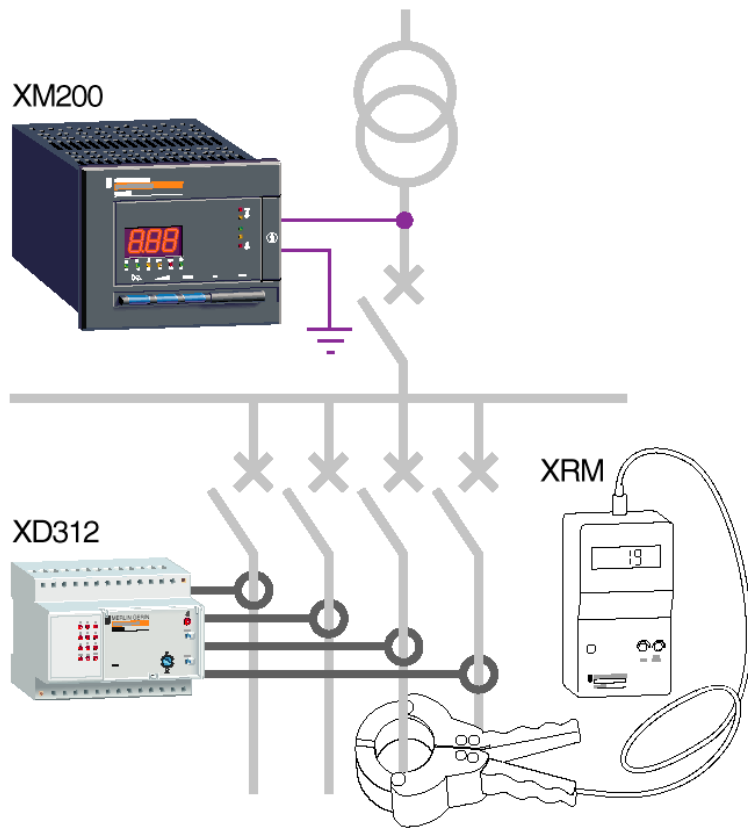
En cas d'un nouveau défaut (ex : Ph2 et masse) et premier défaut non réparé

- On se retrouve maintenant en présence d'un court-circuit franc entre deux phases !
- La coupure du circuit d'alimentation est maintenant impérative

Selon si les masses des appareils sont interconnectées ou non, l'apparition de deux défauts nous emmène en régime TN ou TT (respectivement) :

La protection se fait donc par disjoncteur magnétique ET par disjoncteur différentiel.

Régime IT – Défaits



Dès l'apparition d'un premier défaut, il faut donc le résoudre avec qu'un deuxième n'arrive, sinon la continuité de service n'est plus assurée.

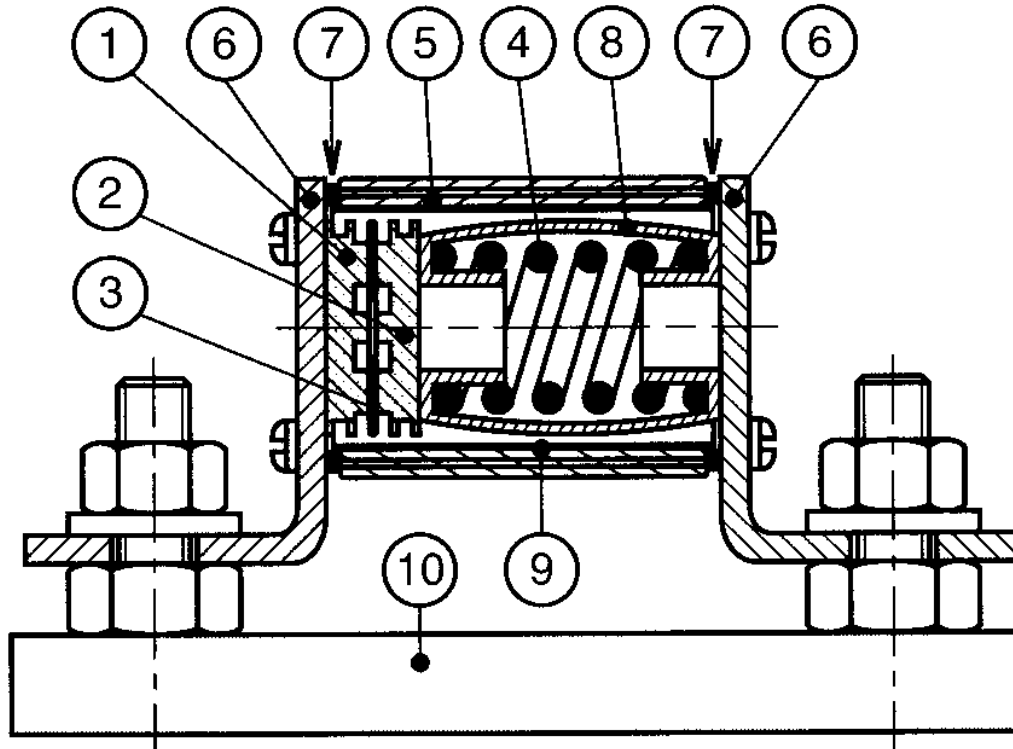
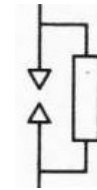
Pour localiser un défaut, on injecte un courant basse fréquence (10 Hz) dans l'installation.

Il ne reste plus qu'à détecter là où il passe.

L'avantage est d'assurer une continuité de service, puisque la seule alternative serait d'ouvrir chaque départ pour retrouver le défaut !

Régime IT – Para-surtenseur

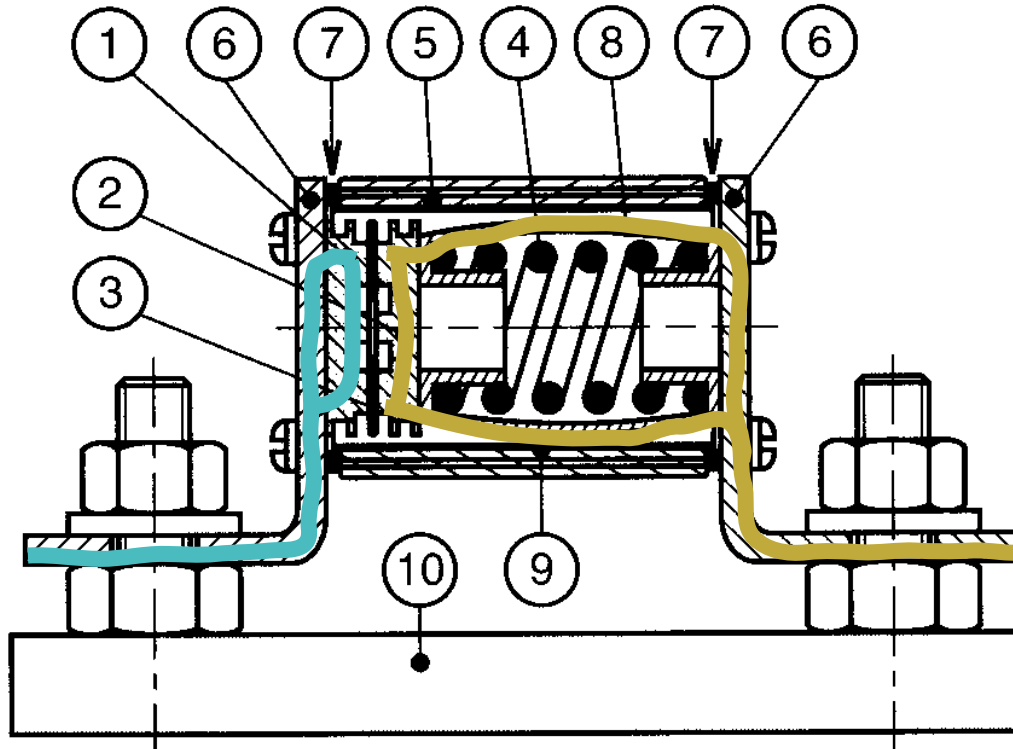
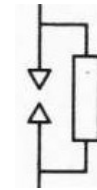
Toujours dans l'optique d'assurer la continuité de service, le CPI contient un para-foudre.



Légende

- 1,2. Électrodes
- 3. Anneau isolant
- 4. Ressort
- 5. Enveloppe stéatite
- 6. Équerres de raccordement
- 7. Joints d'étanchéité
- 8. Tresse conductrice
- 9. Fourreau de protection
- 10. Socle isolant

Toujours dans l'optique d'assurer la continuité de service, le CPI contient un para-foudre.



En cas de surtension :

- Arc entre les électrodes (1) et (2)
- Destruction de l'isolant (3)
- Le ressort (4) presse les deux électrodes l'une contre l'autre

Les deux électrodes sont connectées, donc le Neutre est relié à la terre → Régime TT

Le CPI signale ce défaut, il faudra alors changer le para-foudre.

Le régime de neutre IT permet d'assurer une continuité de service en cas de défaut d'isolement et en cas de surtension (ex : foudre).

Cependant, ceci impose d'avoir son propre transformateur HT/BT puisque tous les transformateurs HT/BT gérés par Enedis sont reliés à la terre.

C'est donc un schéma de mise à la terre utilisé par les industriels ou les lieux pour lesquels l'alimentation électrique est un besoin vital, comme les hôpitaux.

Comparaison des régimes de neutre

Régime TT :

Utilisé pour protéger les personnes des contacts indirects dans les **installations domestiques et tertiaires** car simple à mettre en œuvre, notamment pour étendre une installation existante. Le principal défaut étant le coût des **DDR (Dispositifs Différentiel à courant Résiduel)** à installer.

Régime TN :

Utilisé quand le sol n'est pas assez conducteur OU pour les industriels car moins cher, mais **la protection doit être dimensionnée sur mesure** (et donc ré-adaptée en cas d'extension de l'installation). La protection se fait grâce à la **partie magnétique d'un disjoncteur** (et non avec un DDR).

Régime IT :

Utilisé par les industriels lorsque la **continuité de service est un impératif**. Il s'agit du régime le plus robuste (fonctionne toujours malgré une surtension ou une défaut) mais aussi du plus cher à mettre en œuvre : détection avec un **CPI (Contrôleur Permanent d'Isolément)** et protection avec **disjoncteurs ET différentiels**.

SCHÉMAS DE LIAISON DE MISE À LA TERRE

Comparaison des régimes de neutre

	TT	TN-C	TN-S	IT
Sécurité des personnes	Bien Disjoncteur différentiel obligatoire	Bien Être vigilants et assurer la continuité du conducteur PE lors d'extension d'installation		
Sécurité des biens Risques d'incendie Risques pour les matériels	Bien	Mauvais Courants très élevés dans le conducteur PEN pouvant être > kA Interdit dans les locaux à risque	Mauvais Protection différentielle 500 mA	Bien Recommandé en sécurité intrinsèque car pas d'arc électrique
Disponibilité de l'énergie	Bien	Bien	Bien	Très bien
Comportement en «CEM»	Bien Le PE n'est plus une référence de potentiel unique pour l'installation - Parafoudres à prévoir (distribution aérienne) - Nécessite la gestion des équipements à courants de fuite élevés situés en aval des protections différentielles	Mauvais Circulation de courants perturbateurs dans les masses Rayonnement de perturbations «CEM» par le PE. A déconseiller si générateur d'harmonique dans l'installation	Très bien - Nécessite la gestion des équipements à courant de fuite élevés situés en aval des protections différentielles - Courants de défaut importants dans le PE (perturbations induites) - 1 seule terre	Mauvais Incompatibilité avec l'utilisation de filtre de mode commun. - Il peut être nécessaire de fragmenter l'installation pour réduire la longueur des câbles et limiter les courants de fuite. - Schéma TN au 2ème défaut



Dimitri Boudier – PRAG ENSICAEN
dimitri.boudier@ensicaen.fr

Avec l'aide précieuse de :

- Ahmed Aouchar (ex-PRAG ENSICAEN)



Except where otherwise noted, this work is licensed under
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>