

I.1. GENERALITES

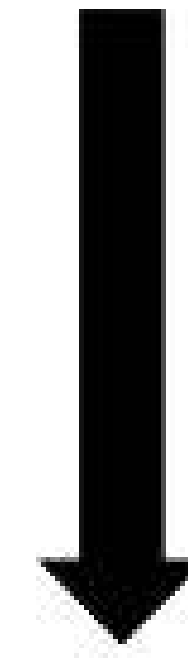
Qu'est-ce qu'un Réseaux électriques ?



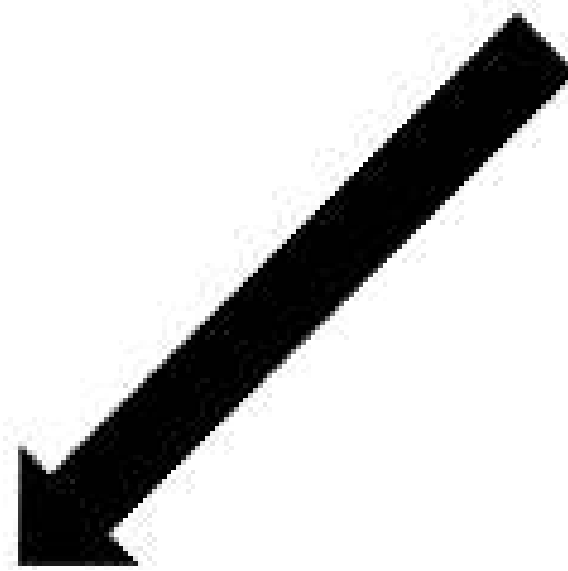
Pourquoi les protéger ?



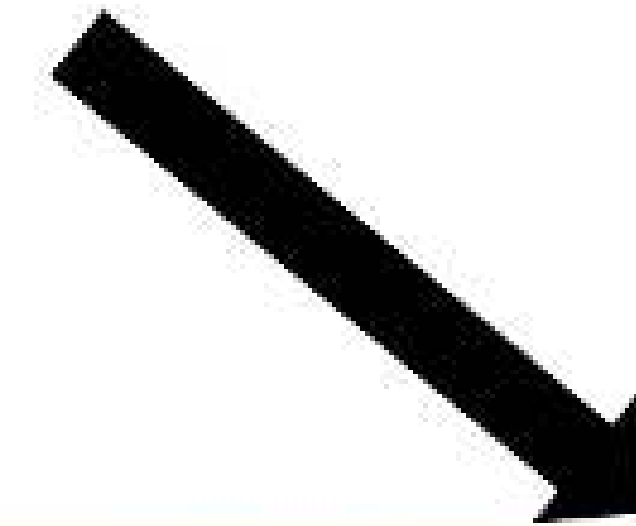
Qu'est-ce qu'un Réseaux électriques ?



un ensemble d'infrastructures énergétiques

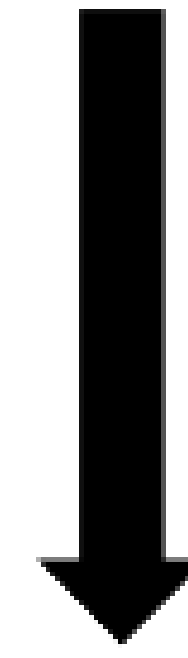


**Lignes
électriques**



**Postes
électriques**

Qu'est-ce qu'un Réseaux électriques ?



Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures énergétiques plus ou moins disponibles permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité.

Il est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques. Les postes électriques permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'une tension à l'autre grâce aux transformateurs.

Un réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble production - transport - consommation, mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité de l'ensemble.

Pourquoi protéger les réseaux électriques ?

La protection est un ensemble d'organes destinés à protéger soit les équipements, soit le personnel.

En règle générale pour protéger une installation il faut :

- **Surveiller le fonctionnement**
- **Détecter un état de dysfonctionnement**

Le problème de la protection des installations consiste à définir la nature des perturbations contre lesquels on doit se protéger, puis à choisir l'appareil capable de les détecter et capable de les supprimer_

Le réseau électrique est assurément protégé lorsque les parties défectueuses sont mises hors tension le plus rapidement possible par les dispositifs de coupure en charge (disjoncteur, fusible, relais,...).

I.2. L'Appareillage de protection

L'objective principale de la protection est d'éliminer le défaut. Selon le type du défaut, la protection intelligente émet un signal de déclenchement du disjoncteur, et par conséquence la mise hors tension de l'installation.

Destinés à éviter que le matériels ne soient parcourus par des courants nuisibles à eux-mêmes et leur environnement, les dispositifs de protections doivent couper en charge le circuit.

La mise en œuvre de la protection des installations électriques nécessite différents appareils dont les fonctions spécifiques doivent être parfaitement maîtrisées.

La nature des dispositifs de protection dépend :

a) du type de protection visé :

✓ Protection contre les surcharges

✓ Protection contre les courts-circuits.

b) de leur capacité à assurer cette protection.

I.3. Les principaux défauts

Une augmentation ou une diminution anormale des grandeurs nominales dans un circuit électrique constitue un défaut ou une perturbation. Ce sont le plus souvent les variations anormales de la tension, de l'intensité et de la fréquence qui sont à l'origine de ces perturbations.

Les défauts les plus courants sont :

- Surtension**
- Baisse ou manque de tension.**
- Surintensité par surcharge.**
- Surintensité par court-circuit.**

I.3. Les principaux défauts

1. Les surtensions

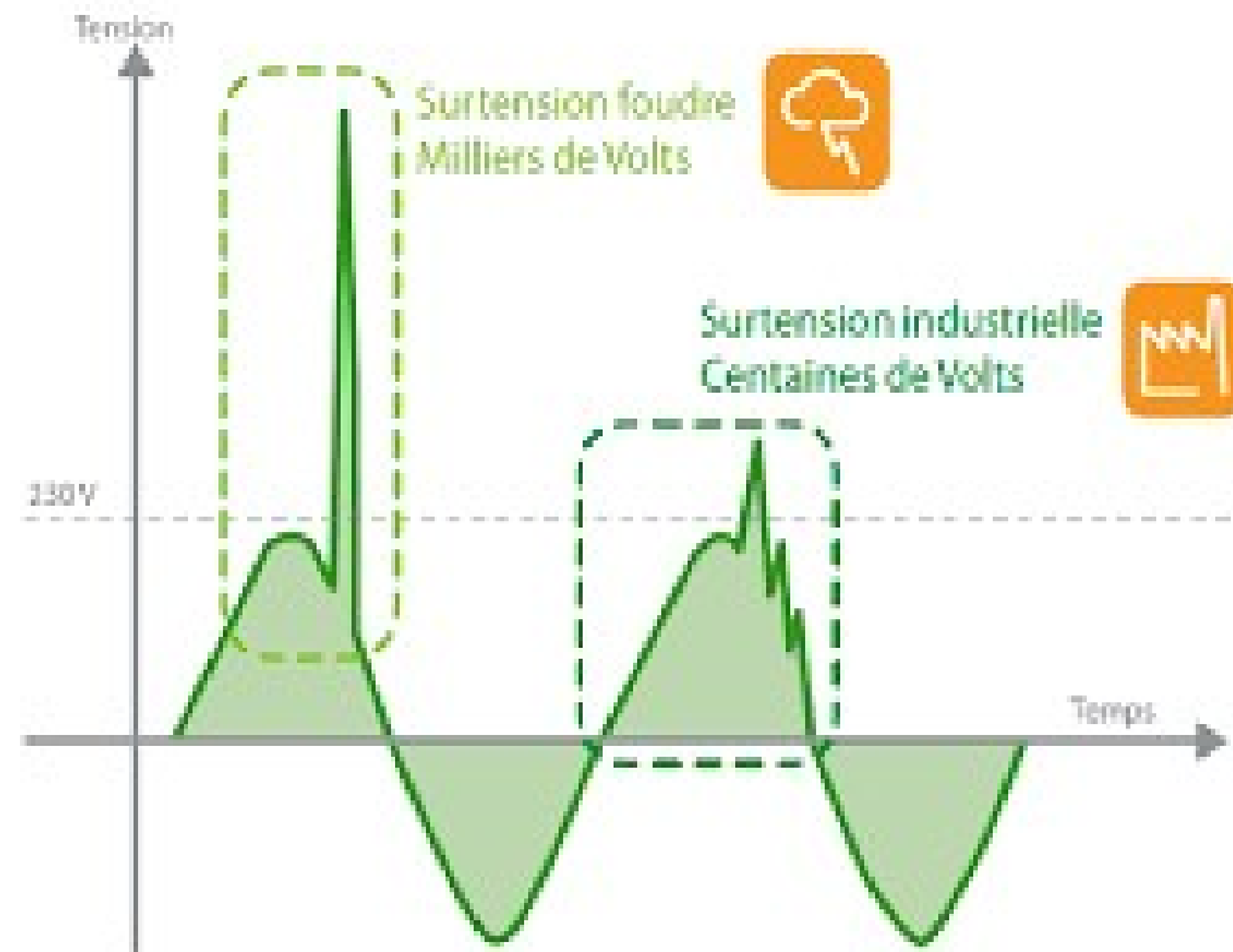
Les surtensions sont des perturbations qui se superposent à la tension nominale d'un réseau. Elles peuvent apparaître :

- ✓ Entre phases ou entre circuits différents.
- ✓ Entre les conducteurs actifs et la masse ou la terre.

Sur cette courbe on voit deux types de surtensions caractérisées par :

- Une impulsion de type choc de foudre
- Une impulsion de type choc de manœuvres.

Ce type de surtension est caractérisé par Le temps de montée en (μs) et une pente S ($\text{kV}/\mu\text{s}$)



I.3. Les principaux défauts

1. Les surtensions

a) Surtension à fréquence industrielle

surtensions à la même fréquence que le réseau (50, 60 ou 400 Hz) causées par un changement d'état permanent du réseau (suite à un défaut : défaut d'isolement, rupture conducteur neutre, ..).

b) Surtensions de manœuvre

La modification brusque de la structure d'un réseau électrique provoque l'apparition de phénomène transitoire. Ceux-ci se traduisent souvent par la naissance d'une onde de surtension ou d'un train d'onde haute fréquence de type apériodique ou oscillatoire à amortissement rapide.

I.3. Les principaux défauts

➤ Surtension de commutation en charge normale

Une charge normale est essentiellement résistive, c'est-à-dire que son facteur de puissance est supérieur à 0,7.

Dans ce cas, la coupure ou l'établissement des courants de charge ne posent aucun problème majeur. Le coefficient de surtension (rapport de l'amplitude de la tension transitoire et de la tension de service) varie entre 1,2 et 1,5.

➤ Surtension provoquée par les manœuvres sur des circuits capacitifs

Par circuits capacitifs, il faut entendre les circuits constitués de batteries de condensateurs et les lignes à vide

- ✓ mise sous tension de batteries de condensateurs
- ✓ mise sous tension de lignes ou câbles à vide.
- ✓ Coupure de circuits capacitifs.

I.3. Les principaux défauts

c) Surtensions d'origine atmosphérique.

La foudre est un phénomène atmosphérique qui constitue une des contraintes majeures pour les réseaux aériens de transport de l'énergie électrique. En fait, il est connu qu'un coup de foudre tombant sur les câbles d'une ligne aérienne entraîne presque toujours un défaut, qui, bien que fugitif, entraîne le déclenchement de la ligne. Il est aussi connu qu'il est possible de réduire le nombre de défauts par un aménagement convenable des lignes et des équipements composant les réseaux, au moyen de l'installation de câbles de garde et d'équipements de protection tel que les parafoudres ou les éclateurs.

I.3. Les principaux défauts

2. Les courts-circuits

Les courts-circuits sont des phénomènes transitoires, ils apparaissent lorsque l'isolement entre deux conducteurs de tensions différentes ou entre un conducteur sous tension et la terre est détérioré. Ils engendrent des courants très importants dans les éléments constituant le réseau.

Les courts-circuits sont de natures et de types différents

- Les courts-circuits monophasés à la terre.**
- Les courts-circuits biphasés à la terre où isolés.**
- Les courts-circuits triphasés à la terre où isolés.**

Les courts-circuits peuvent provoquer des dégâts économiques importants s'ils ne sont pas éliminés rapidement par les systèmes de protection.

I.3. Les principaux défauts

2. Les courts-circuits

1) Origines d'un défaut de court-circuit

Une installation électrique est susceptible de subir des courts-circuits dont l'origine peut être:

- a) **Mécanique**, par exemple une rupture de conducteurs ou une liaison électrique accidentelle entre deux conducteurs par un corps étrangers tels qu'outils ou animaux ;
- b) **Electrique**, suite à la dégradation de l'isolement entre phases ou entre une phase et la masse ou à la terre, ou suite de surtensions d'origine interne (manœuvres) ou atmosphérique (coup de foudre).
- c- **Une erreur d'exploitation**, par exemple la mise à la terre d'une phase, un couplage entre deux sources de tension différentes ou des phases ou la fermeture par erreur d'un appareil de coupure.

I.3. Les principaux défauts

2. Les courts-circuits

Ces courts-circuits peuvent être fugitifs ou permanents.

- ✓ Les défauts fugitifs disparaissent d'eux même après l'ouverture des disjoncteurs de protection et ne réapparaissent pas lors de la remise en service.**
- ✓ Les défauts permanents nécessitent La mise hors tension d'un câble, d'une machine et l'intervention du personnel d'exploitation..**

I.3. Les principaux défauts

2. Les courts-circuits

2). Caractéristiques

Pour choisir convenablement les appareils de coupure (disjoncteurs ou fusibles) et régler les fonctions de protection, quatre valeurs de courant de C-C doivent être connues :

La valeur crête du courant de C-C maximal: (valeur de la première crête de la période transitoire) ; elle détermine

- le pouvoir de fermeture des disjoncteurs et des interrupteurs,
- la tenue électrodynamique des canalisations et de l'appareillage ;

La valeur efficace du courant de C-C maximal: Elle correspond à un court-circuit triphasé symétrique à proximité immédiate des bornes aval de l'appareil de coupure. Cette valeur détermine :

- le pouvoir de coupure des disjoncteurs et des fusibles,
- la contrainte thermique que doit supporter le matériels.

I.3. Les principaux défauts

2. Les courts-circuits

2). Caractéristiques

La valeur maximale des C-C entre phases: elle est indispensable au choix de la courbe de déclenchement des disjoncteurs et des fusibles ou au réglage des seuils des protections à maximum de courant, notamment :

- lorsque la protection des personnes repose sur le fonctionnement des dispositifs de protection à maximum de courant phase ; c'est le cas en basse tension pour les schémas de liaison à la terre TN ou IT,
- afin d'assurer la sélectivité entre les protections.

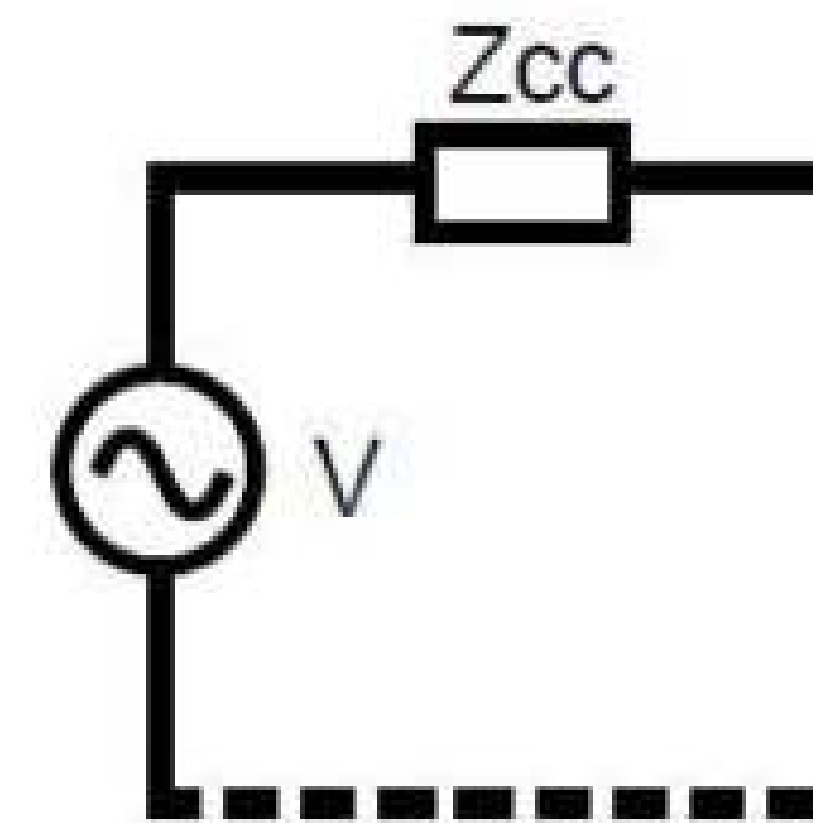
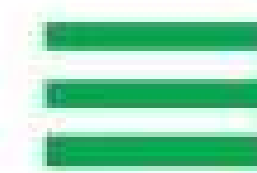
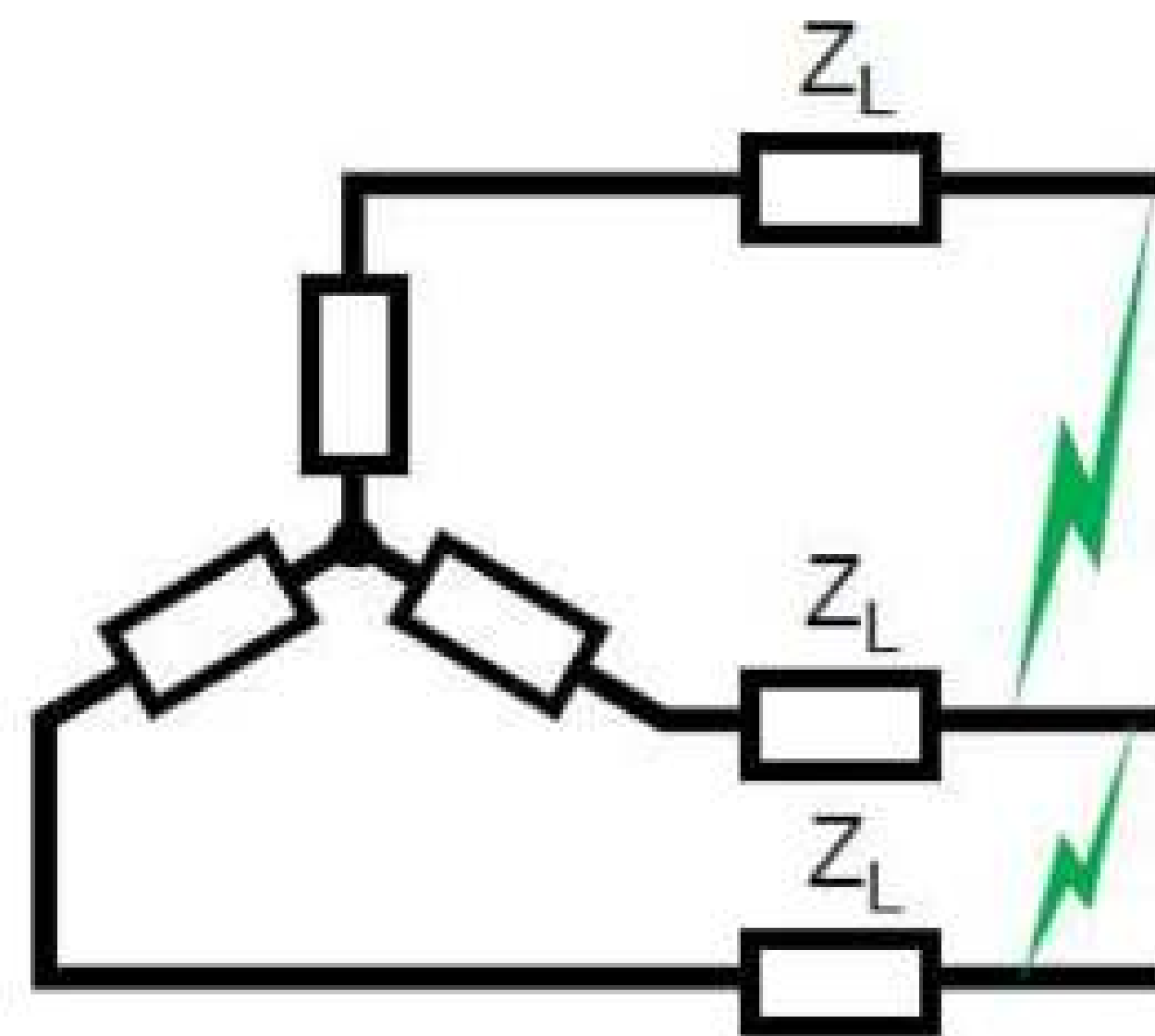
La valeur du courant de C-C monophasé terre ; elle dépend essentiellement du régime de neutre et détermine le réglage des protections contre les défauts à la terre.

I.3. Les principaux défauts

2. Les courts-circuits

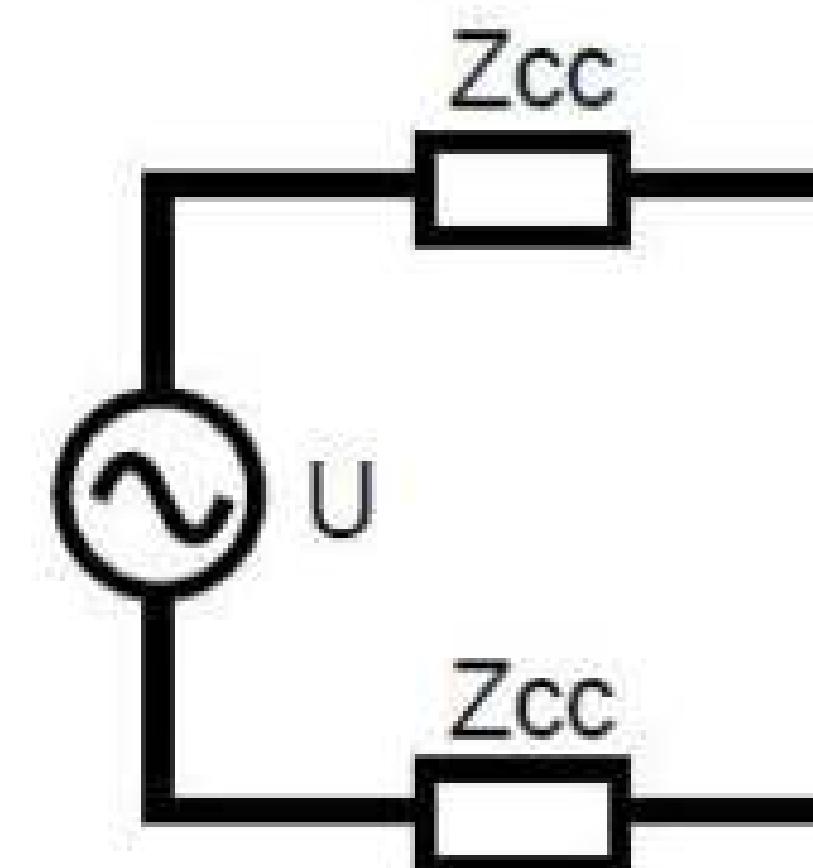
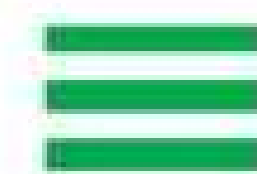
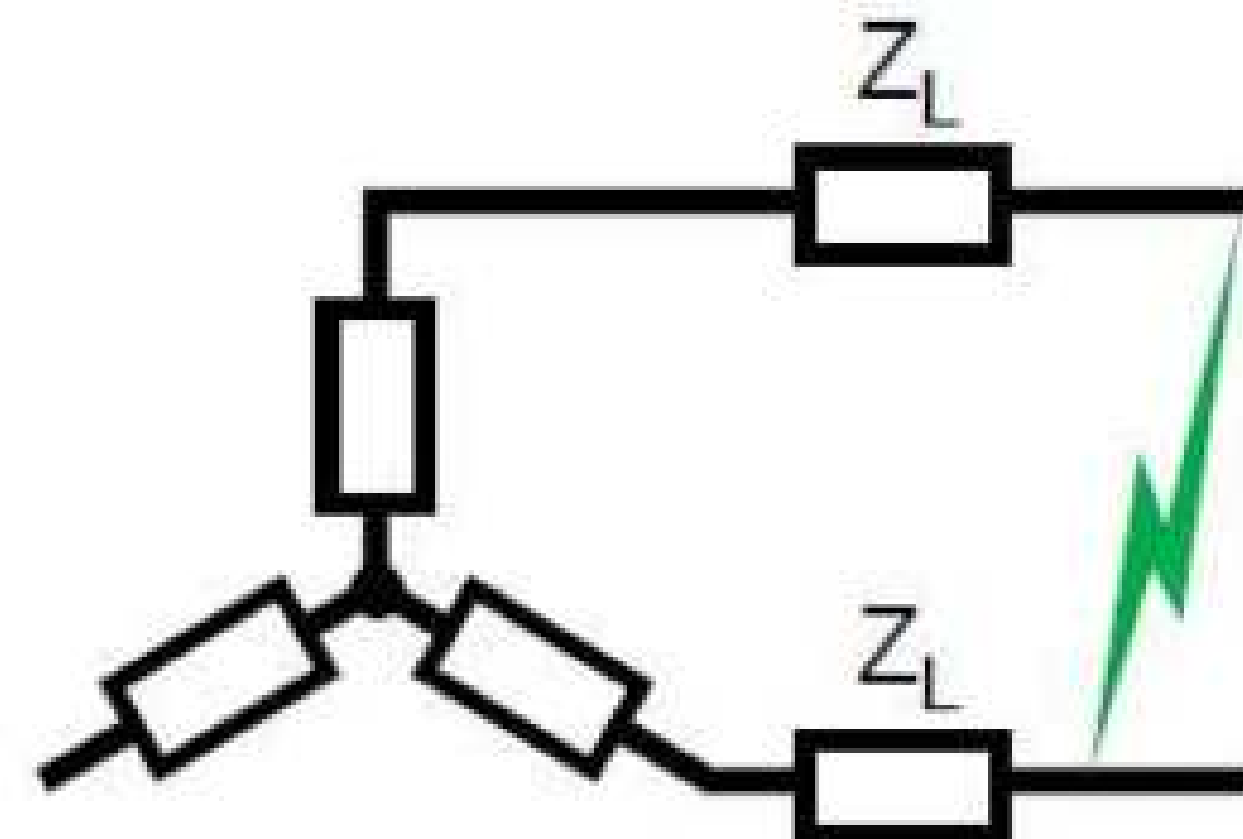
3) Les différents type de court-circuit

Défaut triphasé



$$I_{cc_3} = \frac{U / \sqrt{3}}{Z_{cc}}$$

Défaut biphasé



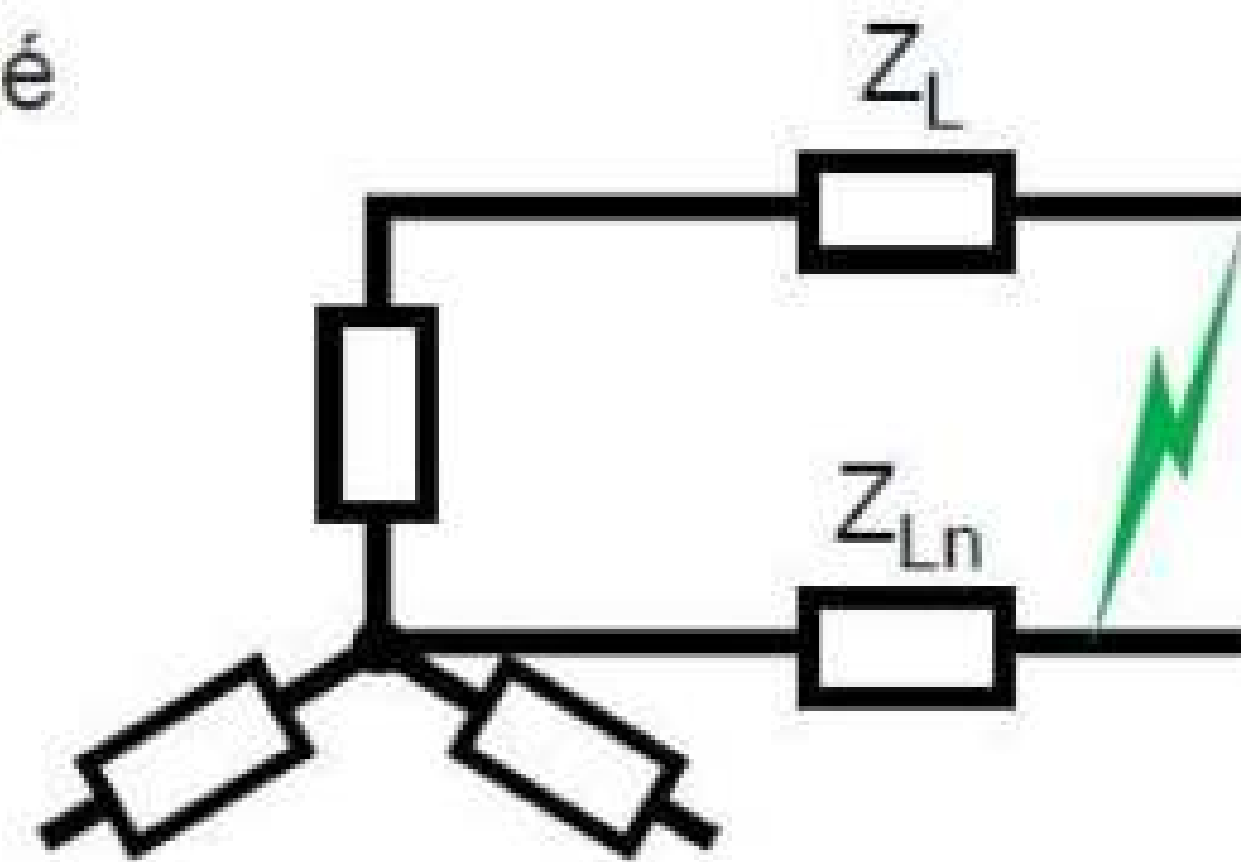
$$I_{cc_2} = \frac{U}{2 \cdot Z_{cc}}$$

I.3. Les principaux défauts

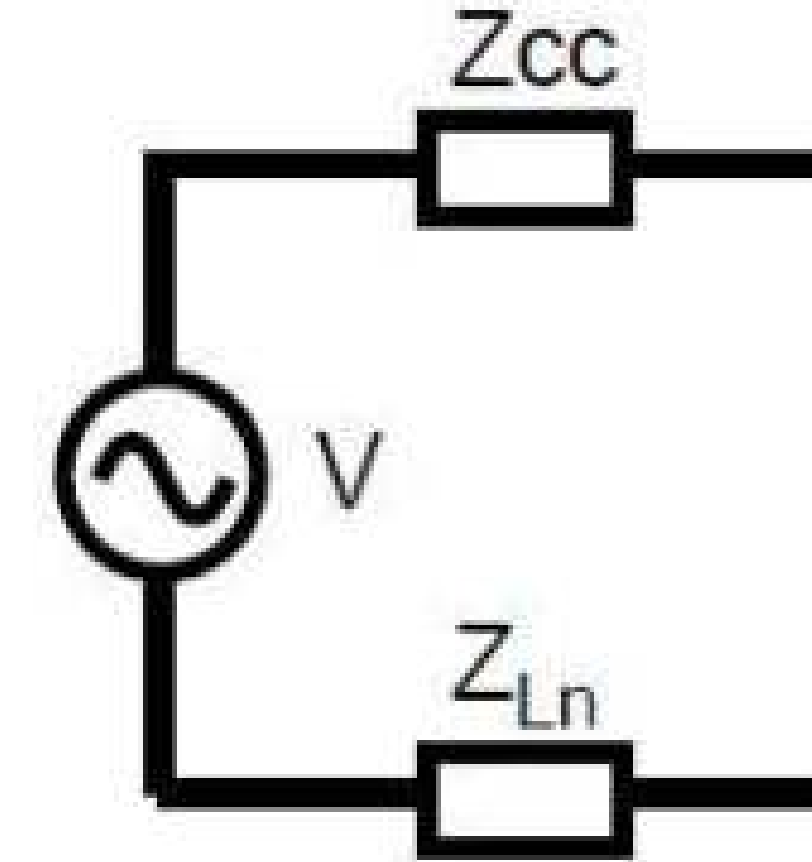
2. Les courts-circuits

3) Les différents type de court-circuit

Défaut monophasé

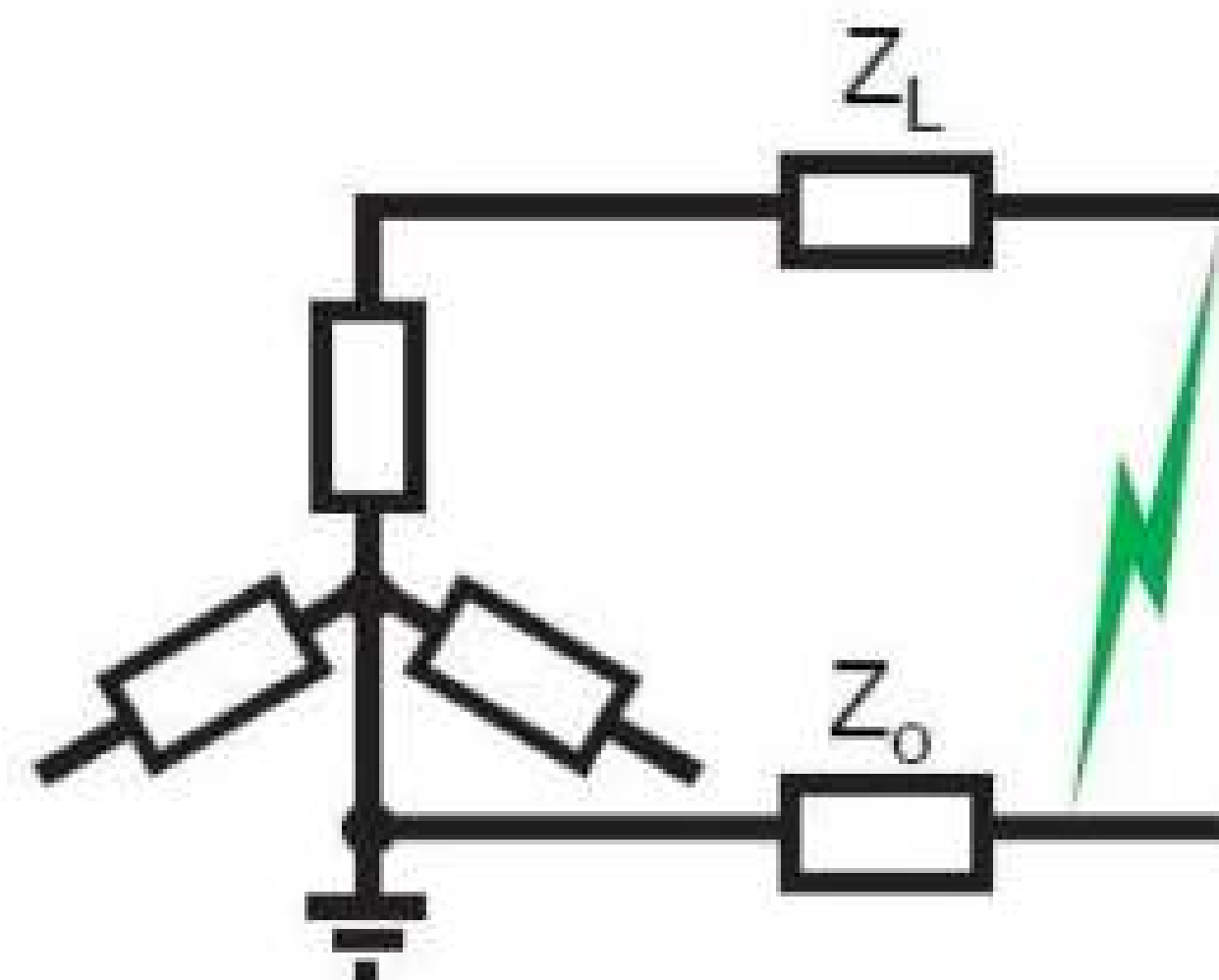


$\equiv$

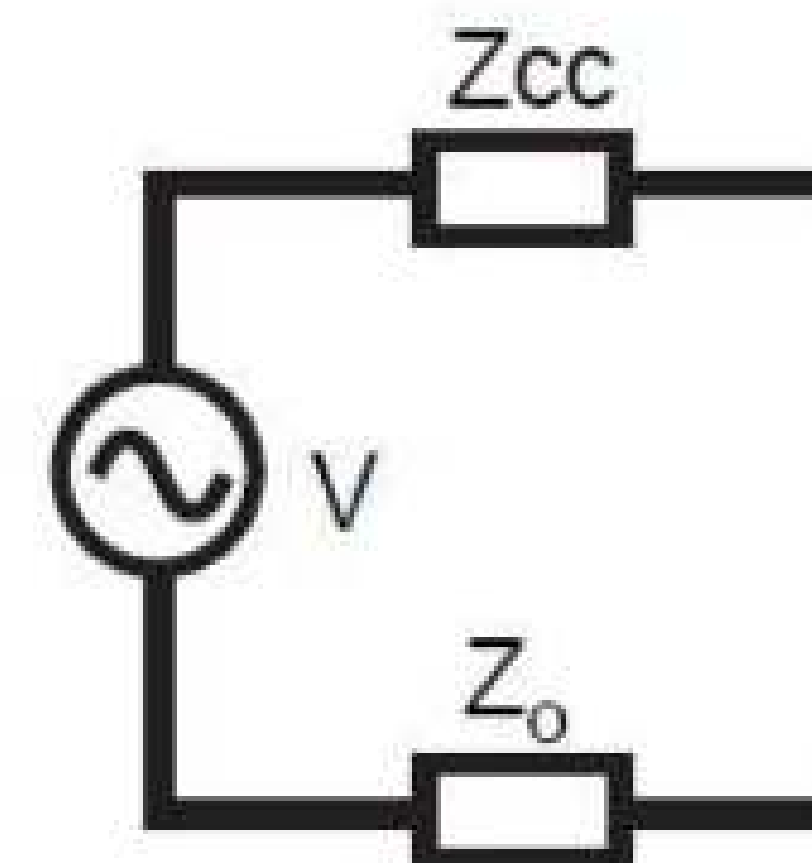


$$I_{cc1} = \frac{U / \sqrt{3}}{Z_{cc} + Z_{Ln}}$$

Défaut terre



$\equiv$



$$I_{cc0} = \frac{U / \sqrt{3}}{Z_{cc} + Z_o}$$

I.3. Les principaux défauts

3. Les surcharges

La surcharge d'un appareil est caractérisée par un courant supérieur au courant admissible, les origines de surcharges sont :

- Les courts-circuits.**
- Les reports de charge.**
- Les pointes de consommation_**
- L'enclenchement des grandes charges.**

Les surcharges provoquent des chutes de tension importantes dans le réseau et accélère le vieillissement des équipements.

I.3. Les principaux défauts

4. Les oscillations

Les oscillations de la tension et du courant sont dues aux variations plus ou moins rapides de la charge qui agit directement sur la vitesse de rotation (fréquence) des machines de production de l'énergie électrique. Elles sont liées directement à la mécanique des machines électriques, c'est la raison pour laquelle on les appelle phénomènes transitoires électromécaniques.

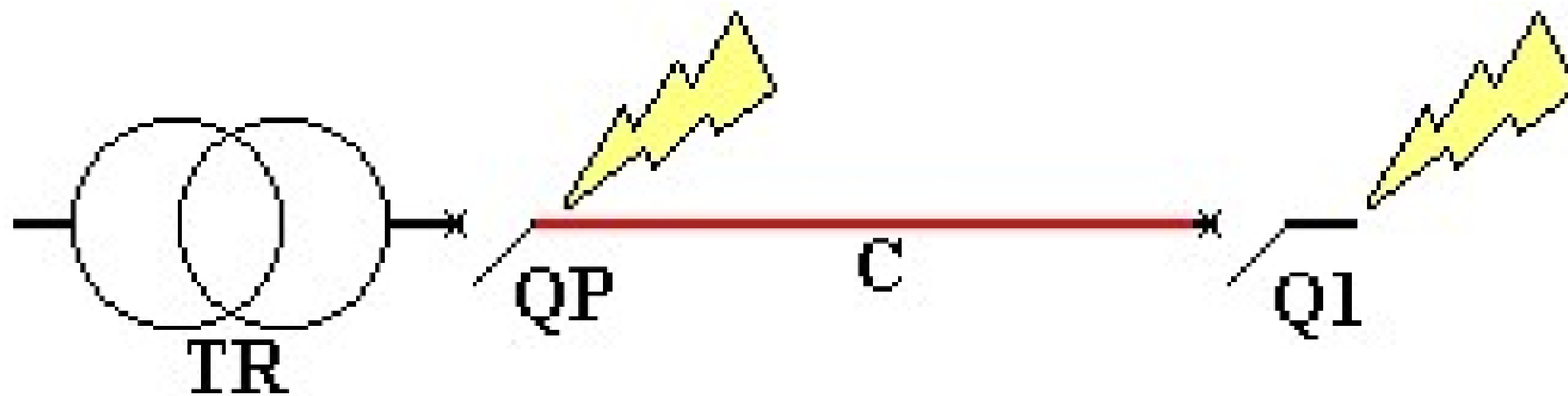
5. Les déséquilibres

Les déséquilibres sont généralement dus à la mauvaise répartition des charges sur les trois phases. Ils apparaissent surtout dans les réseaux de distribution, ils donnent naissance à la composante inverse du courant, cette composante provoque :

- Des chutes de tension supplémentaires.
- Des pertes de puissance.
- Des échauffements.

I.4. Exercice sur les Courts-Circuits

L'installation comprend un transformateur TR, un disjoncteur principal QP, un câble C, un disjoncteur départ moteur Q1. Il s'agit de déterminer le pouvoir de coupure des disjoncteurs QP et Q1.

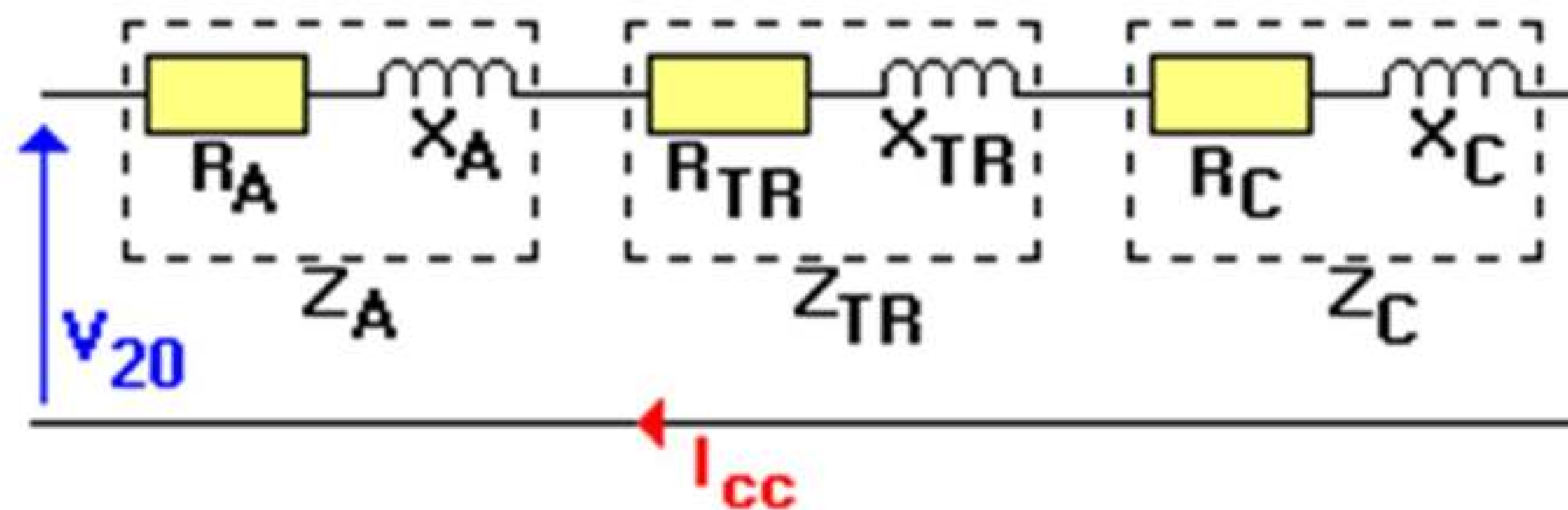


I.4. Exercice sur les Courts-Circuits

Solution

Un court-circuit triphasé en aval de Q1 est limité par l'impédance du réseau en amont du transformateur Z_A , l'impédance du transformateur Z_{TR} et l'impédance du câble Z_C .

On obtient pour une phase, le schéma équivalent suivant:



Il s'agit de déterminer les éléments R_A , R_{TR} , R_C , X_A , X_{TR} , X_C , de façon à calculer le courant de court-circuit. Attention: l'impédance totale n'est pas égale à la somme algébrique des impédances, ces grandeurs étant des grandeurs complexes. Il faut donc additionner séparément les résistances et les réactances jusqu'au point de court-circuit, puis déterminer l'impédance totale.

$$I_{cc} = \frac{V_{20}}{Z_{Totale}} = \frac{U_{20}}{\sqrt{3} \sqrt{\sum R^2 + \sum X^2}}$$

I.4. Exercice sur les Courts-Circuits

Données

Réseau amont (valeurs ramenées au secondaire du transformateur)

$$R_A = 0$$

$$X_A = 0,7 \text{ m}\Omega$$

Transformateur

Puissance: $S = 400 \text{ kVA}$

Pertes cuivre: $PCU = 4600 \text{ W}$

Tension réduite de court-circuit: $U_{CC}(\%) = 4\%$

Tension secondaire à vide: $U_{20} = 410 \text{ V}$

Câble cuivre

Longueur: $L = 25 \text{ m}$

Section: $s = 240 \text{ mm}^2$

Résistivité du cuivre: $r = 22,5 \text{ m}\Omega \cdot \text{Mm}^2 / \text{m}$

Réactance linéique: $0,13 \text{ m}\Omega / \text{m}$

I.4. Exercice sur les Courts-Circuits

Calculs

Transformateur

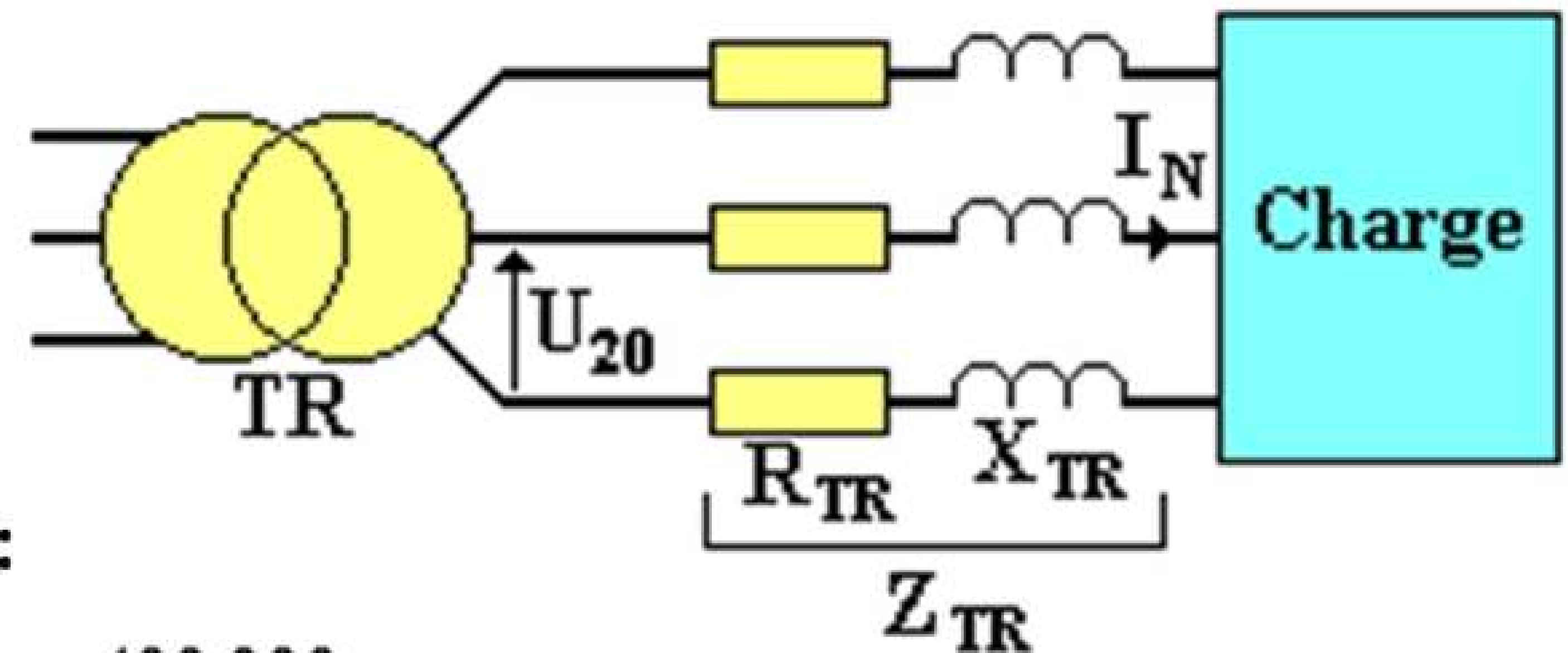
Il s'agit de déterminer les valeurs ramenées au secondaire de la résistance R_{TR} et de la réactance X_{TR} du transformateur.

La puissance plaquée sur le transformateur est:

$$S = \sqrt{3} U_{20} I_N = 400 \text{ kVA} \Rightarrow I_N = \frac{400\,000}{\sqrt{3} \times 410} = 563 \text{ A}$$

Les pertes cuivre sont:

$$P_{CU} = 3 \times R_{TR} \times I_N^2 = 4600 \text{ W} \Rightarrow R_{TR} = \frac{4600}{3 \times 563^2} = 4,84 \text{ m}\Omega$$



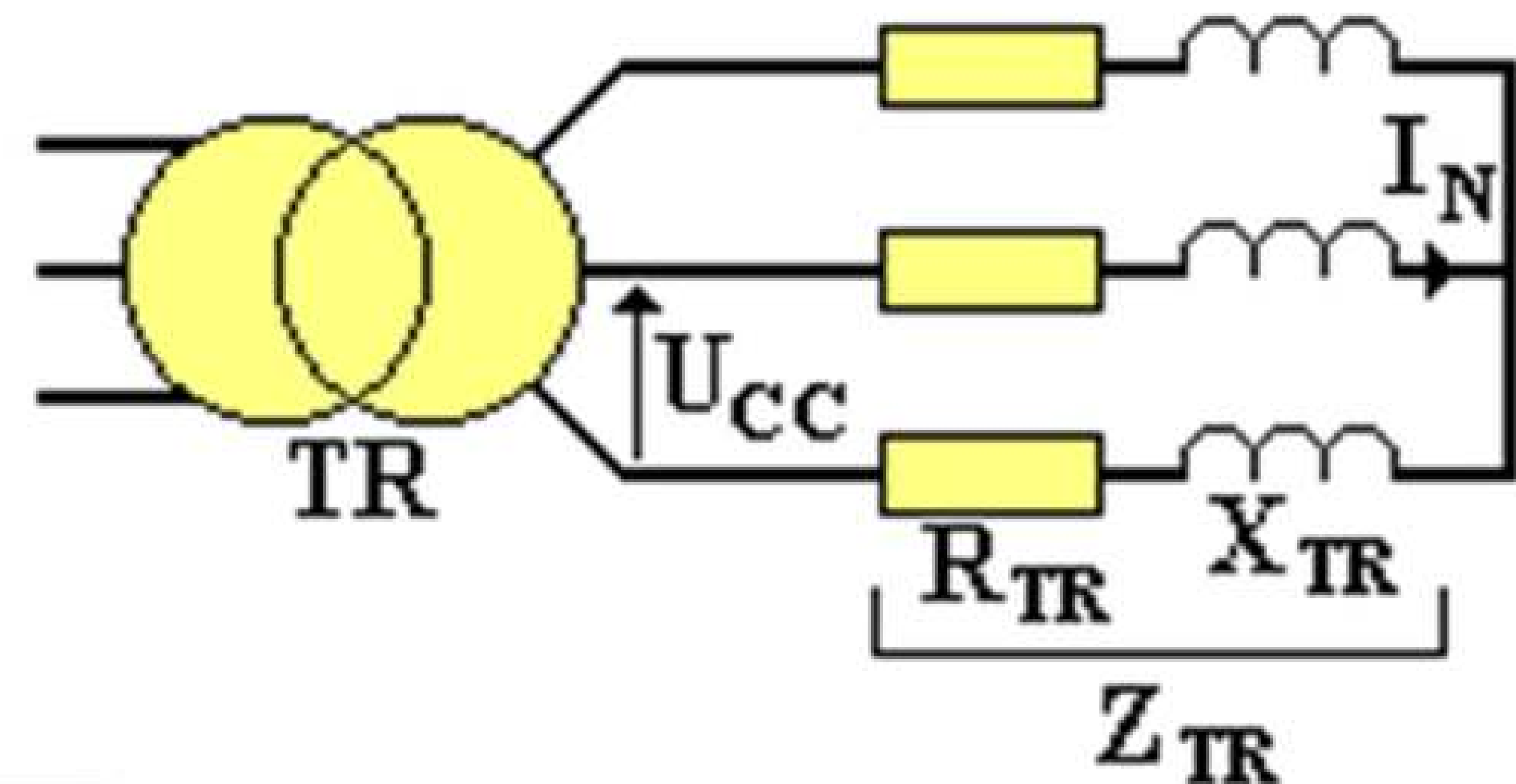
I.4. Exercice sur les Courts-Circuits

Calculs

Transformateur

La tension réduite de court-circuit U_{cc} est la valeur de U_{20} qui donne le courant nominal I_N lorsque la sortie est en court-circuit. Elle s'exprime en % de U_{20} .

$$Z_{TR} = \frac{U_{cc}}{\sqrt{3} \times I_N} = \frac{4}{100} \frac{U_{20}}{\sqrt{3} \times I_N} = \frac{4 \times 410}{100 \times \sqrt{3} \times 563} = 16,82 \text{ m}\Omega$$



$$X_{TR} = \sqrt{Z_{TR}^2 - R_{TR}^2} = \sqrt{16,82^2 - 4,84^2} = 16,11 \text{ m}\Omega$$

I.4. Exercice sur les Courts-Circuits

Calculs

Câble

Résistance

$$R_C = \rho \cdot \frac{L}{s} = 22,5 \cdot \frac{25}{240} = 2,34 \text{ m}\Omega$$

Réactance

$$X_C = 0,13 \times 25 = 3,25 \text{ m}\Omega$$

Court-circuit en aval de QP

$$Z_1 = \sqrt{R_{TR}^2 + (X_A + X_{TR})^2} = \sqrt{4,84^2 + (0,7 + 16,11)^2} = 17,49 \text{ m}\Omega$$

$$I_{CC1} = \frac{U_{20}}{Z_1 \times \sqrt{3}} = \frac{410}{17,49 \times \sqrt{3}} = 13,5 \text{ kA}$$

Le pouvoir de coupure de QP doit être supérieur à 13,5 kA

I.4. Exercice sur les Courts-Circuits

Calculs

Court-circuit en aval de Q1

$$Z_2 = \sqrt{(R_{TR} + R_C)^2 + (X_A + X_{TR} + X_C)^2} = \sqrt{(4,84 + 2,34)^2 + (0,7 + 16,11 + 3,25)^2} = 21,3 \text{ m}\Omega$$

$$I_{CC2} = \frac{U_{20}}{Z_1 \times \sqrt{3}} = \frac{410}{21,3 \times \sqrt{3}} = 11,1 \text{ kA}$$

Le pouvoir de coupure de Q1 doit être supérieur à 11,1 kA

Chapitre II

Elément du système de protection

II.1. Modèle structural de principe

Un système de protection consiste d'un ensemble de dispositifs destinés à la détection des défauts et des situations anormales des réseaux afin de commander le déclenchement d'un ou de plusieurs éléments de coupures.

Un système de protection est constitué :

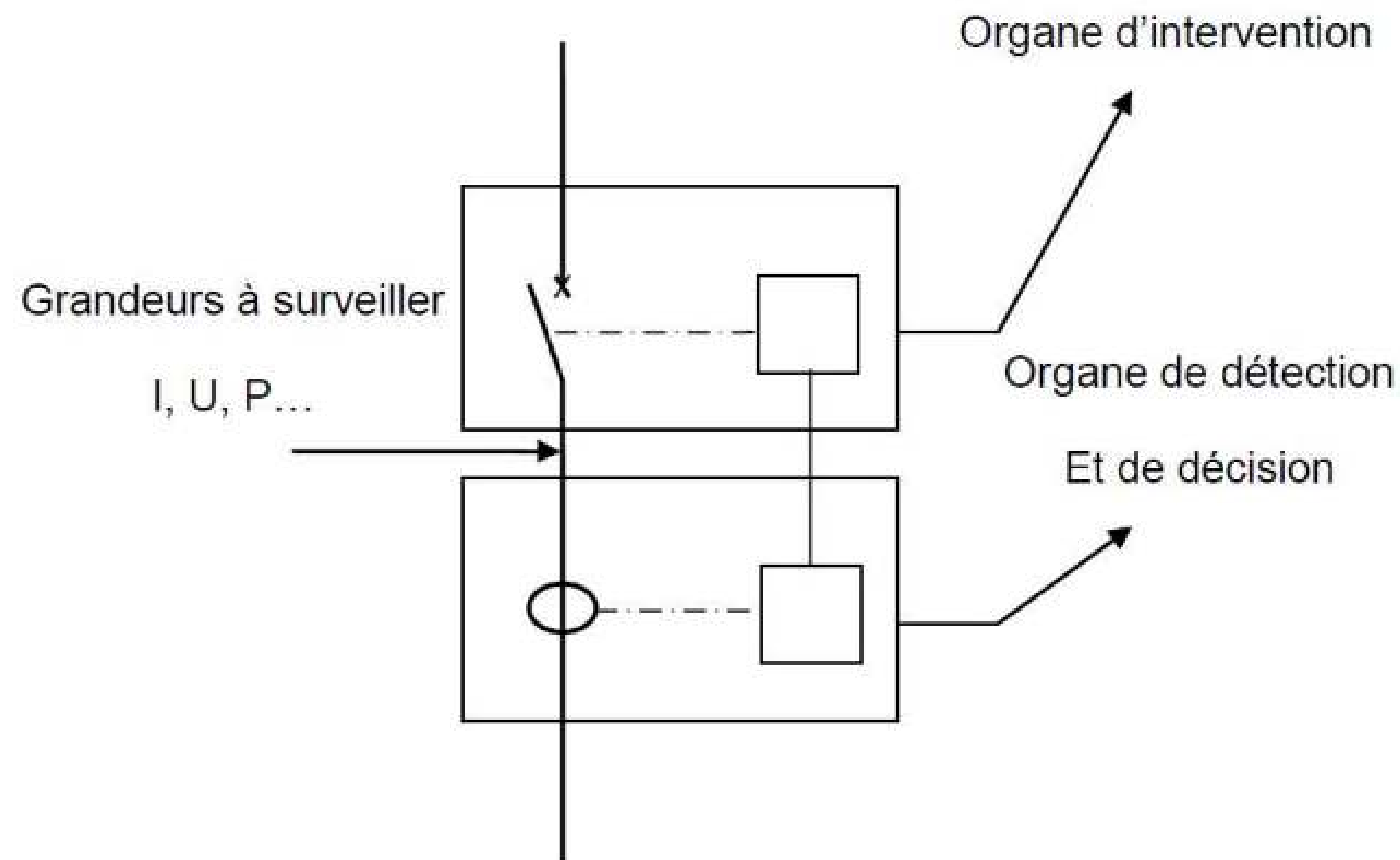
a) Organe de détection et de décision

- 1- Organe de mesure ou chaîne de mesure par l'intervention des réducteurs de mesure.
- 2- Organe de comparaison par l'intervention des différents types relais.
- 3- Organe de décision

b) Organe d'intervention

Organe de signalisation et de déclenchement par l'intervention de disjoncteur

Le schéma suivant représente le principe de base d'un système de protection :

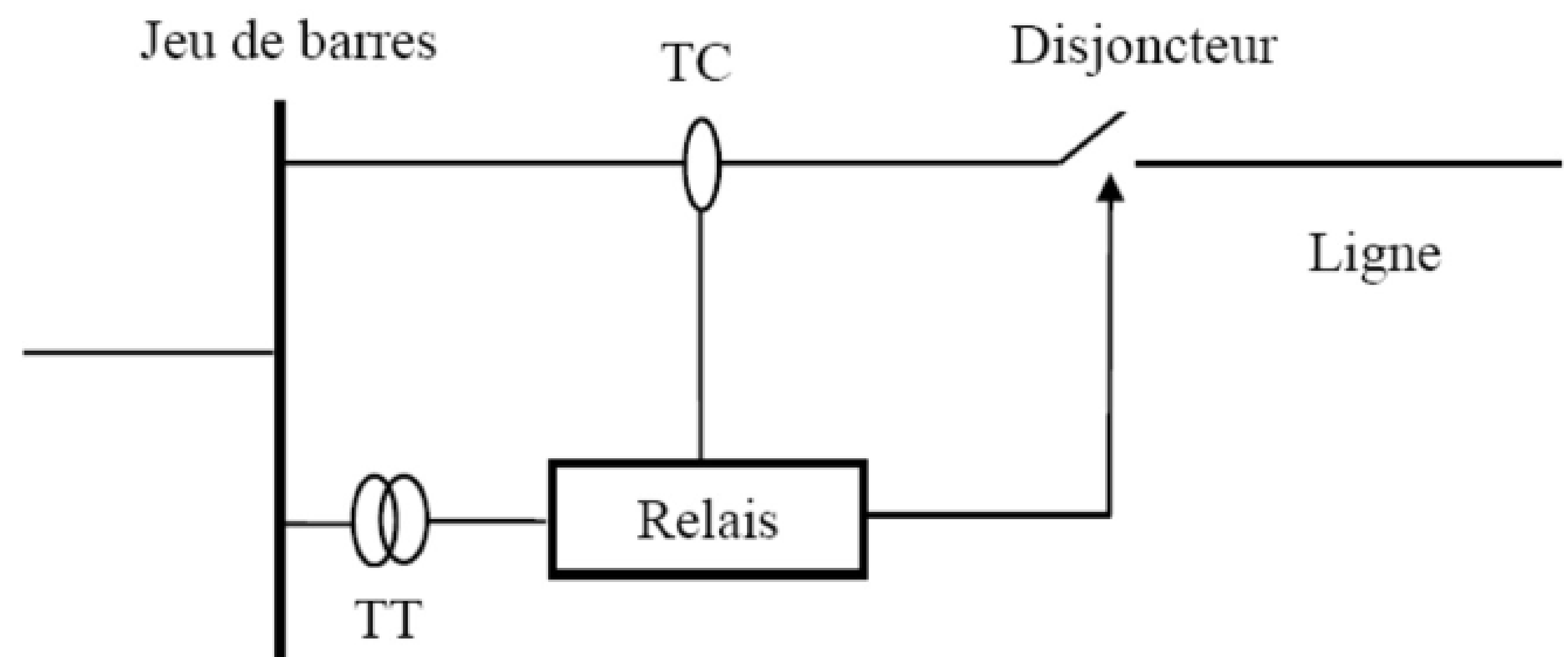


II.2. Schéma synoptique d'un système de protection

Quelque soit la technologie, le système de protection est composé de trois parties fondamentales :

- Des capteurs ou réducteurs de mesure qui abaissent les valeurs à surveiller (courant, tension...) à des niveaux utilisables par les protections ;
- Des relais de protection ;
- Un appareillage de coupure (un ou plusieurs disjoncteurs).

La Figure représente un exemple d'un système de protection pour une ligne HT, Dans le cas d'un défaut, le relai a besoin de fonctionner, donc le disjoncteur s'ouvre et la ligne est mise hors service.



Chaîne principale de la protection électrique²³

II.2. Schéma synoptique d'un système de protection

Les relais de protection sont connectés aux transformateurs de mesure (TC et TT) pour recevoir des signaux d'entrée et aux disjoncteurs pour délivrer des commandes d'ouverture ou de fermeture. Donc en cas de défaut, la tâche du disjoncteur consiste à éliminer le défaut tandis que la tâche du relais de protection est de détecter ce défaut.

Les fonctions de protection sont complétées par des fonctions de :

- commandes complémentaires,**
- surveillance de bon fonctionnement,**
- exploitation,**
- signalisation,**
- mesure,**
- diagnostic,**
- communication,**

Pour permettre une meilleure maîtrise du système électrique. Toutes ces fonctions peuvent être assurées par une seule et même unité numérique de protection.

II.3. Éléments constitutifs d'un système de protection

Pour un fonctionnement fiable du réseau électrique, des protections sont nécessaires aux différents niveaux. Le choix des éléments de protection et de la structure globale de l'ensemble, de façon cohérente et adaptée au réseau, Les fonctions de protection sont réalisées par des relais ou des appareils multifonctions. A l'origine, les relais de protection étaient de type analogique et effectuaient généralement une seule fonction.

Un système de protection est constitué par :

- Relais**
- Transformateurs**
- Fusible**
- Disjoncteur**

II.3. Éléments constitutifs d'un système de protection

II.3.1. Relais

Les relais de protection sont des appareils qui reçoivent un ou plusieurs informations (signaux) d'une grandeur à caractère analogique (courant, tension, puissance, fréquence, température, ...etc.) et le transmettent à un ordre binaire d'action de fermeture ou ouverture d'un circuit de commande.

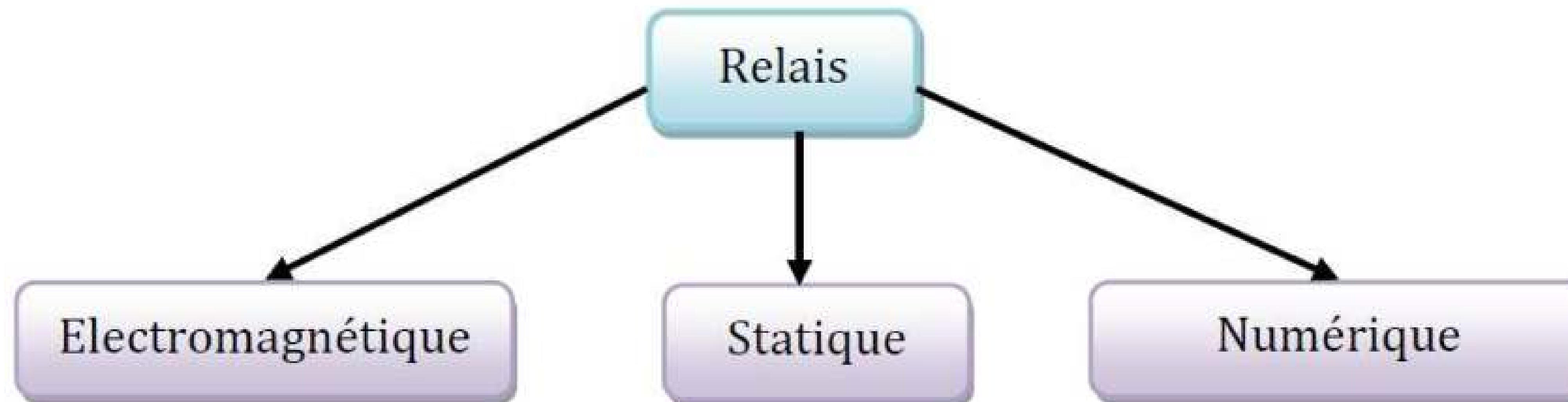
Un relais de protection détecte l'existence de conditions anormales par la surveillance continue, détermine quels disjoncteurs ouvrir et alimente les circuits de déclenchement.

Différents types de relais

Le relais est chargé de la surveillance permanente de l'état électrique du réseau, jusqu'à l'élaboration des ordres d'élimination des parties défectueuses, et leur commande par le circuit de déclenchement.

II.3. Éléments constitutifs d'un système de protection

Un relais de protection électrique, partagé en trois types :



Différents types de relais.

II.3. Éléments constitutifs d'un système de protection

II.3.2. Les réducteurs de mesures

Les dispositifs de protection ou de mesure nécessitent de recevoir des informations sur les grandeurs électriques des matériels à protéger.

Pour des raisons techniques, économiques et de sécurité, ces informations ne peuvent pas être obtenues directement sur l'alimentation haute tension des matériels ; il est nécessaire d'utiliser des dispositifs intermédiaires dénommés réducteurs de mesure ou capteurs :

- capteurs de courant phase,
- capteurs tore pour la mesure des courants terre,
- transformateurs de tension (TT).

Ces dispositifs remplissent les fonctions suivantes :

- réduction de la grandeur à mesurer (ex : 1500/5 A),
- découplage galvanique,
- fourniture de l'énergie nécessaire au traitement de l'information, voire au fonctionnement de la protection.

II.3. Éléments constitutifs d'un système de protection

a) Capteurs de courant phase (TC)

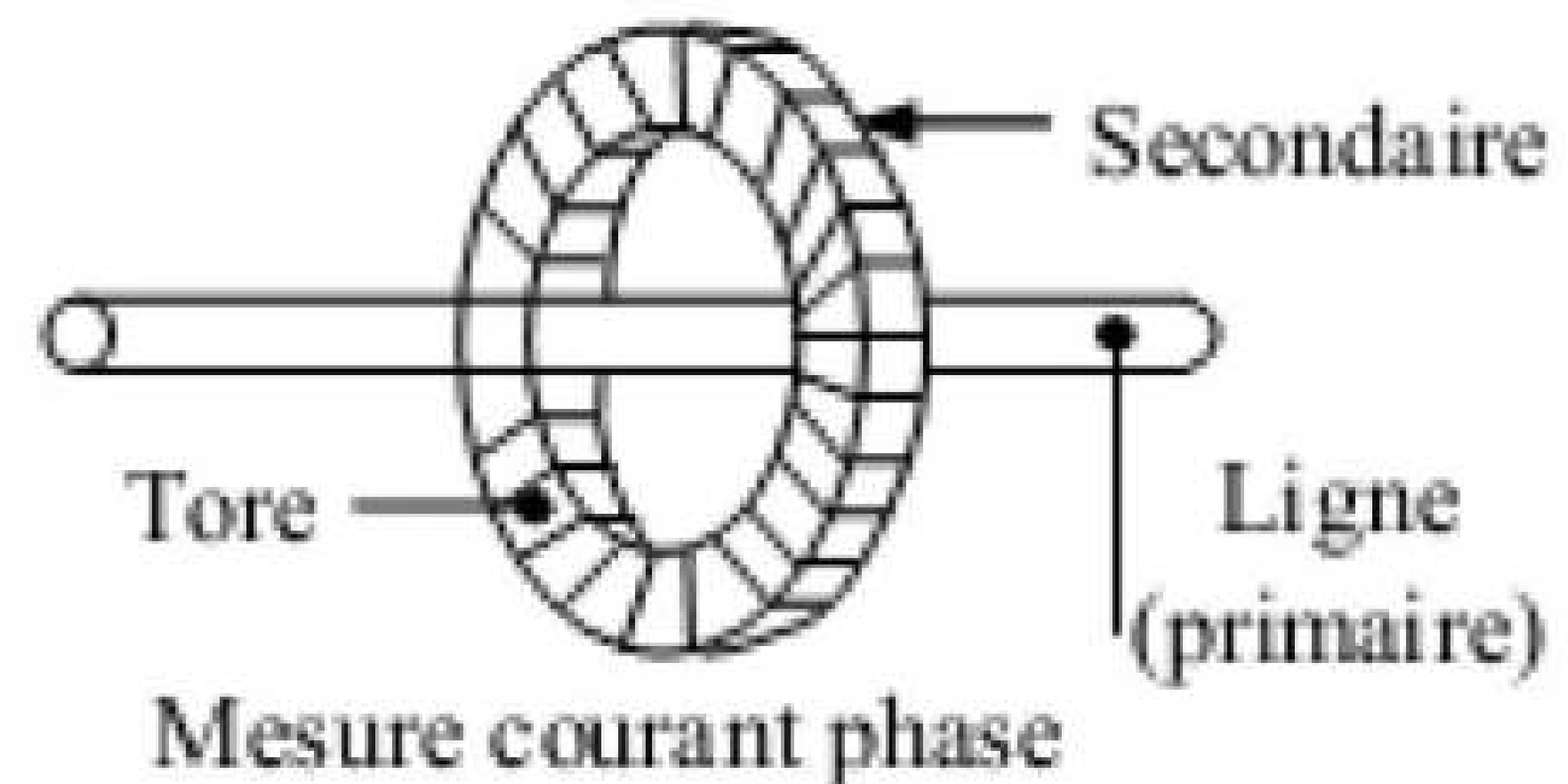
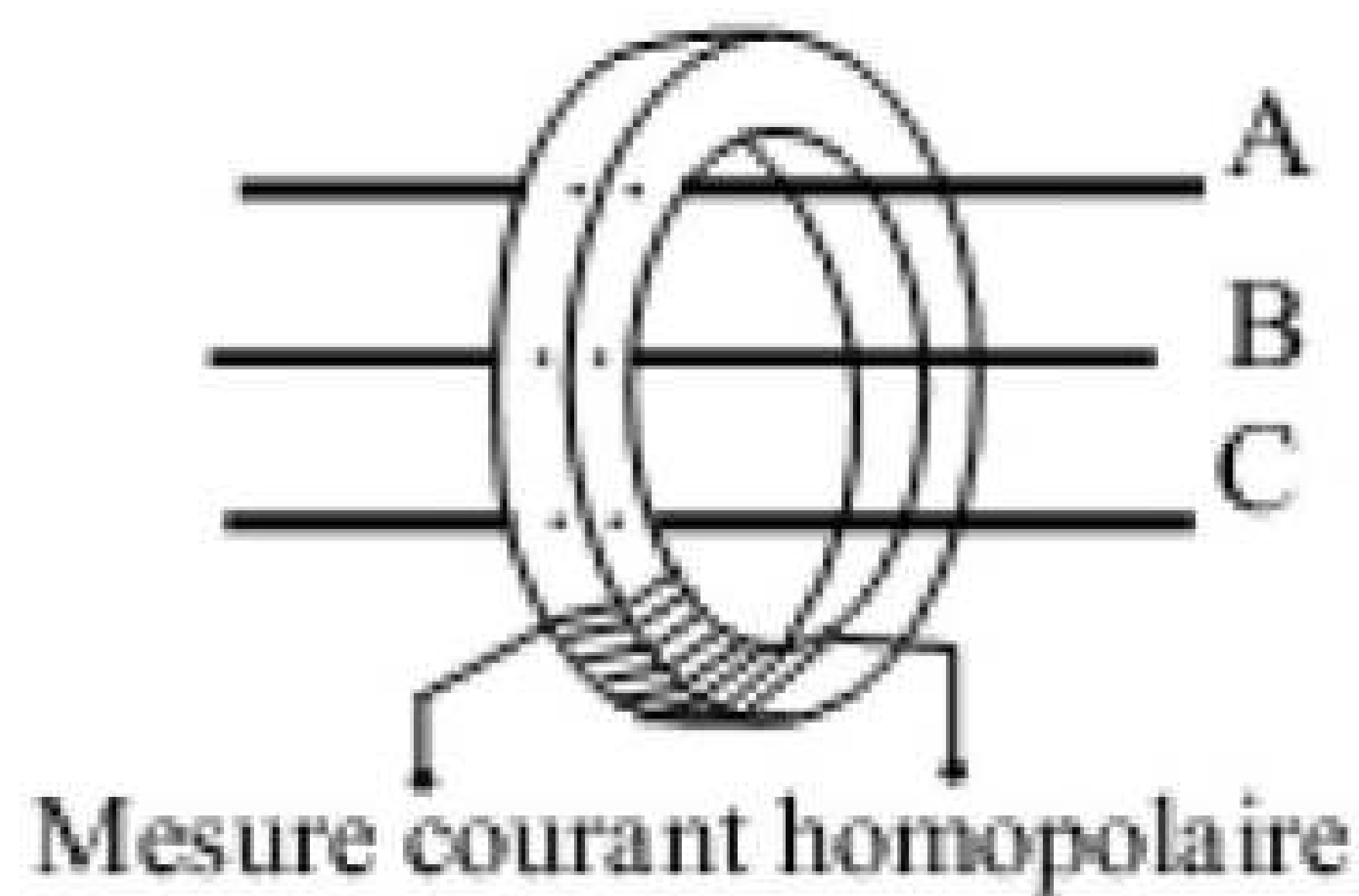
ils fournissent un courant proportionnel au courant traversant le câble afin d'effectuer un comptage de l'énergie ou d'analyser ce courant par un dispositif de protection.

Du point de vue électrique, les TC (Figure) ont plusieurs rôles :

- Délivrer à leur secondaire une image fidèle de l'intensité qui circule dans la ligne concernée.
- Assurer l'isolement galvanique entre la ligne et les circuits de mesure et de protection.
- Protéger les circuits de mesure et de protection de toute détérioration lorsqu'un défaut survient sur la ligne.

II.3. Éléments constitutifs d'un système de protection

a) Capteurs de courant phase (TC)



Figure, Transformateur de courant type tore

II.3. Éléments constitutifs d'un système de protection

a) Capteurs de courant phase (TC)

Ces transformateurs alimentent des dispositifs de mesure et de protection. L'isolation galvanique sépare électriquement le circuit secondaire du circuit primaire. Elle permet la mise à la terre du dispositif de mesure ou de protection et assure ainsi la sécurité du personnel d'exploitation.

Le secondaire est connecté sur une faible impédance : *le TC est donc utilisé presque en court-circuit.*

$$P = Z I_s^2 \qquad U_s = Z I_s$$

Avec P est la puissance fournie au secondaire.

Si $Z=0 \Rightarrow P=0$ et $U_s=0$, il n'y a pas donc de risque de destruction.

Par contre si le secondaire est ouvert $Z \rightarrow \infty$, $P \rightarrow \infty$ et $U_s \rightarrow \infty$. Les pics de tension peuvent atteindre plusieurs Kv ce qui est dangereux pour le matériel et le personnel.

Il ne faut donc jamais laisser ouvert le circuit secondaire d'un TC.

II.3. Éléments constitutifs d'un système de protection

a) Capteurs de courant phase (TC)

Caractéristiques d'un TC

Les TC sont caractérisés par les grandeurs suivantes (d'après les normes CEI 60044).

Courant primaire assigné: il est défini par la norme et doit être choisi parmi les valeurs suivantes: 10 - 12,5 - 15 - 20 - 25 - 30 - 40 - 50 - 60 - 75 et leurs multiples ou facteurs décimaux.

Courant secondaire nominal: il est égal à 1 A ou 5 A.

Rapport de transformation (Kn): Il est donné sous la forme du rapport des courants primaires et secondaires I_p/I_s . Le courant secondaire assigné est généralement 1 A ou 5 A.

Exemple : 100/5A. $kn = \frac{I_{pn}}{I_{sn}} = 20.$

II.3. Éléments constitutifs d'un système de protection

Puissance de précision: il s'agit de la puissance apparente (en VA à un facteur de puissance spécifié) que le transformateur peut fournir au circuit secondaire (câble de liaison + résistance d'entrée du dispositif de protection) en maintenant ses caractéristiques limite de précision. Les valeurs normalisées sont: 1 - 2,5 - 5 - 10 - 15 - 30 VA.

$$P_n = R_n (I_{sn})^2$$

Classe de précision:

Elle est définie par l'erreur composée pour le courant limite de précision I_{pl}

Le facteur limite de précision (FLP) est le rapport entre le courant limite de précision I_{pl} et le courant assigné I_{pn}

$$FLP = \frac{I_{pl}}{I_{pn}}$$

II.3. Éléments constitutifs d'un système de protection

Transformateurs de courant utilisés pour la mesure conformément à la norme CEI 60044-1

Il existe deux exigences pour les TC de mesures. ils doivent:

- avoir un niveau de précision adapté à l'application pour le courant de fonctionnement normal;
- protéger les appareils en cas de courant de défaut.

La précision est définie par la classe de précision déterminant l'erreur d'amplitude de phase et de courant admissible sur une plage de 5% à 120% du courant primaire nominal.

Les classes de précision CEI normalisées sont: 0,1 - 0,2 - 0,5 - 1 - 3 - 5.

- Les classes 0,5 et 1 sont utilisées dans la majorité des cas.
- La classe 0.2 n'est utilisée que pour le comptage de précision.
- Les classes 0,1 - 3 - 5 ne sont jamais utilisées en moyenne tension.

II.3. Éléments constitutifs d'un système de protection

Exemple de transformateur de courant de mesure

500/1 A 15 VA cl 0.5

- Courant primaire nominal 500 A.
- Courant secondaire nominal 1 A.
- Classe de précision: 0,5.
- Puissance de précision: 15 VA.

❑ Pour un courant compris entre 100% et 120% du courant nominal, l'erreur de courant est inférieure à $\pm 0,5\%$ et l'erreur de déphasage est inférieure à ± 30 mn.

❑ Pour un courant compris entre 20% et 100% du courant nominal, l'erreur de courant est inférieure à $\pm 0,75\%$ et l'erreur de déphasage est inférieure à ± 45 mn.

Accuracy class	Rated primary current %	Current error $\pm\%$	Phase displacement error $\pm$ mn
0.2	5	0.75	30
	20	0.35	15
	10	0.2	10
	120	0.2	10
0.5	5	1.5	90
	20	0.75	45
	100	0.5	30
	120	0.5	30
1	5	3	180
	20	1.5	90
	100	1	60
	120	1	60
3	50	3	no limit
	120	3	no limit
5	50	5	no limit
	120	5	no limit

II.3. Éléments constitutifs d'un système de protection

Transformateurs de courant utilisés pour la protection conformément à la norme CEI 60044-1

Il existe deux exigences pour les transformateurs de courant de protection, ils doivent avoir :

- un facteur limite de précision (FLP)
- une classe de précision adaptés à l'application.

Le facteur limite de précision est le rapport entre:

- ✓ le courant limite de précision pour lequel l'erreur est garantie inférieure à 5 ou 10% tant que la classe de précision est 5P ou 10P
- ✓ le courant primaire assigné.

$$FLP = \frac{I_{pl}}{I_{pn}}$$

Les valeurs CEI FLP sont: 5 - 10 - 15 - 20 - 30.

Accuracy class	Composite error at accuracy limit current	Current error at I_n	Phase displacement error for rated current
5P	5%	$\pm 1\%$	± 60 mn
10P	10%	$\pm 3\%$	no limit

II.3. Éléments constitutifs d'un système de protection

Transformateurs de courant utilisés pour la protection conformément à la norme CEI 60044-1

Le TC est caractérisé par :

$$I_{pn} / I_{sn} , P_n , \text{classe de précision} , FLP$$

Exemple de transformateur de courant de protection

100/1 A 15 VA 5P10

Courant primaire nominal (I_{pn}): 100 A.

Courant secondaire nominal (I_{sn}): 1 A.

Puissance de précision: 15 VA.

Classe de précision: 5P.

Facteur limite de précision (FLP): 10.

II.3. Éléments constitutifs d'un système de protection

Exemple de transformateur de courant de protection

100/1 A 15 VA 5P10

Courant primaire nominal (I_{pn}): 100 A

Courant secondaire nominal (I_{sn}): 1 A.

Puissance de précision: 15 VA.

Classe de précision: 5P.

Facteur limite de précision (FLP): 10.

Accuracy class	Composite error at accuracy limit current	Current error at I_n	Phase displacement error for rated current
5P	5%	$\pm 1\%$	± 60 mn
10P	10%	$\pm 3\%$	no limit

Le courant limite de précision primaire est : $I_{pl} = I_{pn} * \text{FLP} = 100 * 10 = 1000\text{A}$

Le courant limite au secondaire permettant de rester dans une précision de 5% est:

$$I_{sl} = \left(\frac{I_{pl}}{k_n} \right) \pm 5\% = 10 \pm 0,5 \text{ A}$$

La résistance nominale de précision au secondaire est :

$$R_n = \frac{P_n}{(I_{sn})^2} = \frac{15}{1^2} = 15 \Omega$$

II.3. Éléments constitutifs d'un système de protection

Exemple de transformateur de courant de protection

100/1 A 15 VA 5P10

Courant primaire nominal (I_{pn}): 100 A.

Courant secondaire nominal (I_{sn}): 1 A.

Puissance de précision: 15 VA.

Classe de précision: 5P.

Facteur limite de précision (FLP): 10.

Donc ce TC est destiné à mesurer des courant ne dépassant pas les 1000A, avec une résistance de fileteries et de relais ne dépassant pas les 15Ω pour rester dans les limites de précision de 5%.

II.3. Éléments constitutifs d'un système de protection

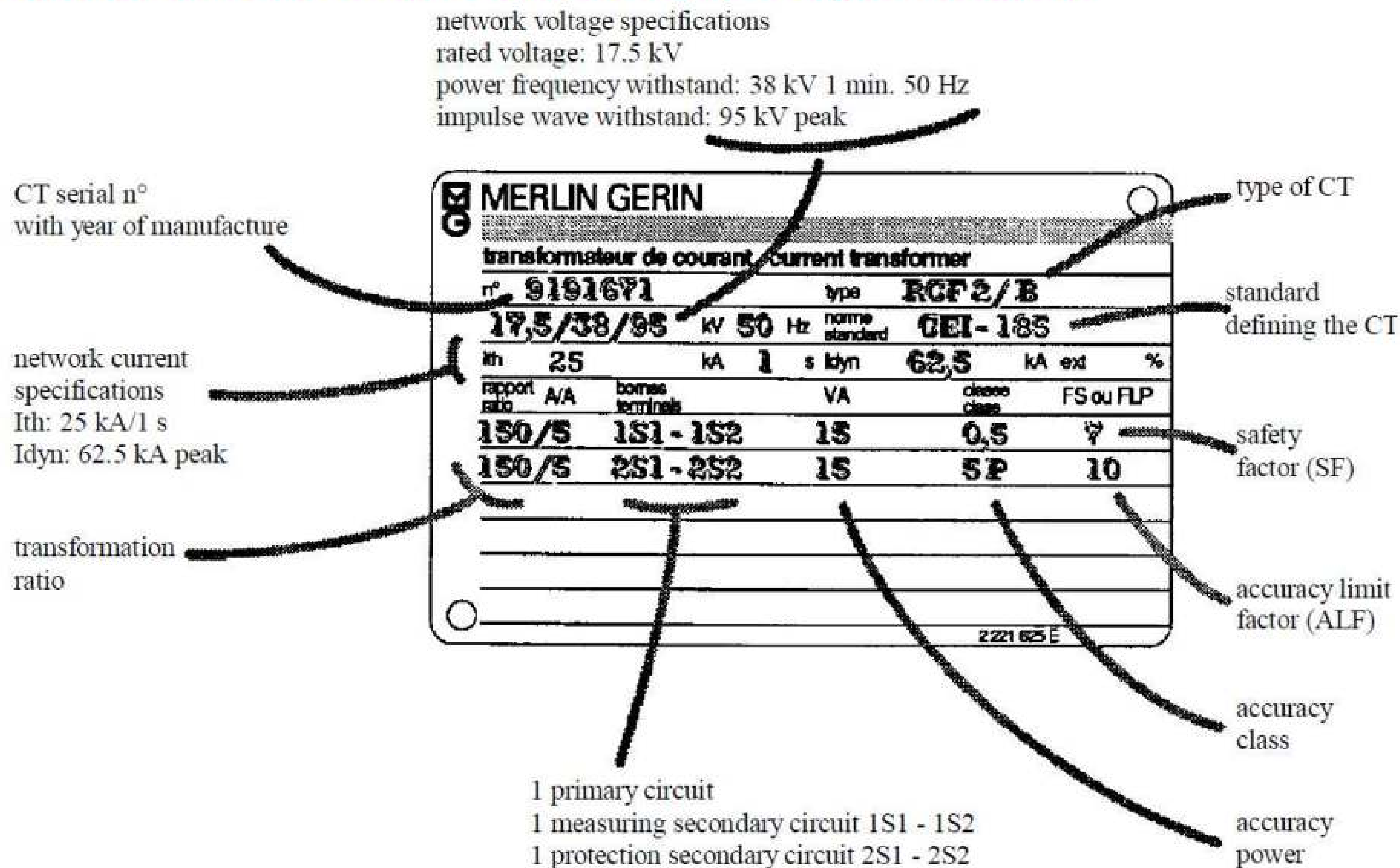


Figure. exemple de plaque signalétique d'un transformateur de courant

II.3. Éléments constitutifs d'un système de protection

a) Transformateurs de tension (TT)

Les transformateurs de tension, (potential transformer PT, appelés aussi capacitor coupling voltage transformer CVT) sont utilisés pour baisser le niveau de tension à des valeurs typiques de 100 ou 110 V entre phase, (Norme IEC 60186).

Ils sont caractérisés par :

- Le rapport de transformation**
- La classe de précision**
- La puissance d'échauffement**

II.3. Éléments constitutifs d'un système de protection

a) Transformateurs de tension (TT)

Le transformateur de tension est un transformateur connecté à une impédance très élevée (utilisé sur un circuit presque ouvert).

Un transformateur de tension est conçu pour donner au secondaire une tension proportionnelle à celle appliquée au primaire. Pour un TT, le rapport tension primaire/tension secondaire est constant. La tension secondaire est indépendante de la charge.

Considérons le schéma électrique simplifié du transformateur de tension (voir Figure suivante).

II.3. Éléments constitutifs d'un système de protection

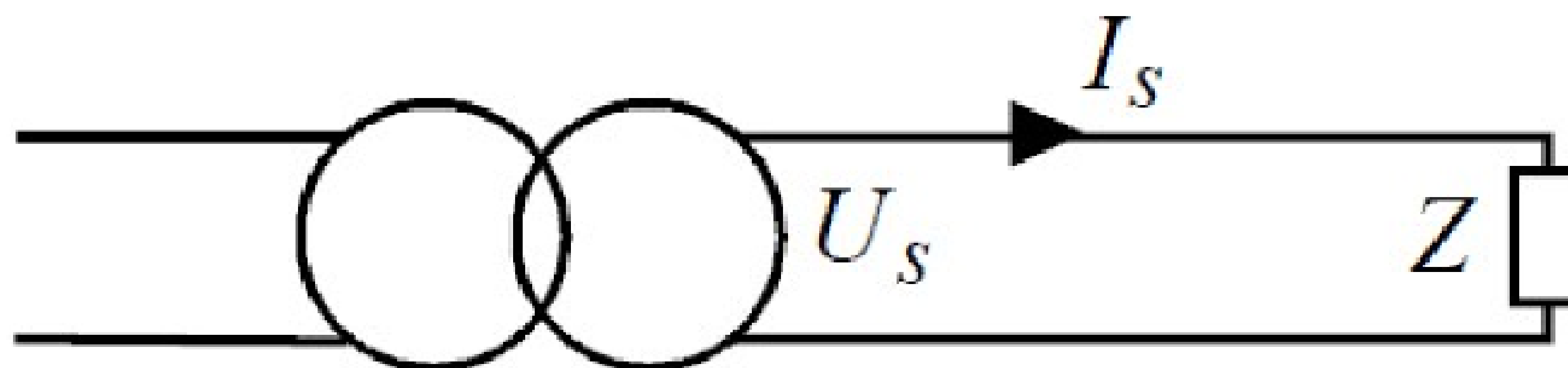


Figure. schéma électrique simplifié du transformateur de tension

P: puissance circulant vers le secondaire

I_s: courant secondaire

U_s: tension secondaire (imposée par le circuit primaire)

Si Z est l'impédance de charge secondaire du TT (transformateur de tension), alors:

$$P = \frac{U_s^2}{Z} \text{ et } I_s = \frac{U_s}{Z}$$

Si Z augmente, alors P et I_s diminuent.

Aux bornes d'un TT, il est ainsi possible d'installer une impédance d'une valeur comprise entre l'impédance nominale et l'infini des TT sans aucun risque.

Un TT peut ainsi être laissé dans un circuit ouvert sans aucun risque.

II.3. Éléments constitutifs d'un système de protection

Par contre, si Z est réduit, le courant fourni est trop élevé et le TT va se dégrader.

Ne court-circuitiez jamais un TT.

La CEI 60044-2 définit les exigences auxquelles les transformateurs de tension doivent répondre.

Le TT comprend un enroulement primaire, un circuit magnétique, un ou plusieurs enroulements secondaires, l'ensemble étant scellé dans une résine isolante.

II.3. Éléments constitutifs d'un système de protection

Caractéristiques d'un TT

Le transformateur de tension doit être conforme aux spécifications du réseau.

Comme pour tout appareil, le transformateur de tension doit répondre aux exigences relatives

- la tension, le courant et la fréquence.

Les spécifications du transformateur de tension ne sont valables que pour des conditions normales d'utilisation.

Tension secondaire nominale: elle est égale à 100 ou 110 V pour les TT phase / phase. Pour les transformateurs monophasés conçus pour être connectés entre une phase et la terre, la tension secondaire nominale est divisée par $\sqrt{3}$.

Par exemple: $\frac{100}{\sqrt{3}}$

II.3. Éléments constitutifs d'un système de protection

Puissance de précision: elle est exprimée en VA et c'est la puissance apparente que le transformateur de tension peut fournir au secondaire lorsqu'il est connecté sous sa tension primaire nominale et connecté à sa charge de précision. Il ne doit pas introduire d'erreur au-delà des valeurs garanties par la classe de précision.

Les valeurs normalisées sont:

10 - 15 - 25 - 30 - 50 - 75 - 100 - 150 - 200 - 300 - 400 - 500 - VA.

Classe de précision: définit le rapport de transformation garanti et les limites d'erreur de phase dans des conditions de puissance et de tension spécifiées.

Erreur de rapport de tension: c'est l'erreur que le transformateur introduit dans la mesure de tension:

$$\text{erreur de tension (\%)} = \frac{(K_n U_s - U_p) \times 100}{U_p}$$

II.3. Éléments constitutifs d'un système de protection

Transformateurs de tension utilisés pour la mesure conformément à la norme CEI 60044-2

Le Tableau donne la classe de précision généralement utilisée conformément à l'application correspondante.

Application	Classe de précision
non utilisé dans l'industrie	0,1
mesure de précision	0,2
mesure habituel	0,5
comptage statistique et / ou mesure	1
mesure ne nécessitant pas de haute précision	3

La classe de précision est garantie si la tension est comprise entre 80 et 120% de la tension primaire nominale et pour toute charge comprise entre 25 et 100% de la puissance de précision nominale avec un facteur de puissance inductif de 0,8.

Les classes de précision CEI normalisées sont: 0,1 - 0,2 - 0,5 - 1 - 3.

- Les classes 0.1 et 0.2 ne sont utilisées que pour les appareils de laboratoire.
- Les classes 0,5 et 1 sont utilisées dans la majorité des cas.
- La classe 3 est très peu utilisée.

II.3. Éléments constitutifs d'un système de protection

Transformateurs de tension utilisés pour la mesure conformément à la norme CEI 60044-2

Tableau : erreurs maximales de tension selon la classe de précision pour la mesure des TT

Exemple de transformateur de tension de mesure

$$\frac{20000}{\sqrt{3}} / \frac{110}{\sqrt{3}}, 100 \text{ VA } c/1$$

Tension primaire = 20 000 V / $\sqrt{3}$

Tension secondaire = 110 V / $\sqrt{3}$

Puissance de précision = 100 VA

Classe de précision = 1

Cela signifie que pour une charge comprise entre $100/4 = 25 \text{ VA}$ et 100 VA , et une tension primaire comprise entre:

$$20000 \cdot \frac{80}{100} = 16000 \text{ V et } 20000 \cdot \frac{120}{100} = 24000 \text{ V}$$

L'erreur de tension sera de plus ou moins 1%.

Accuracy class	Voltage error (of ratio) in $\pm\%$
0.1	0.1
0.2	0.2
0.5	0.5
1.0	1.0
3.0	3.0

II.3. Éléments constitutifs d'un système de protection

Transformateurs de tension utilisés pour la protection conformément à la norme CEI 60044-2

Les classes de précision CEI sont 3P et 6P. En pratique, seule la classe 3P est utilisée.

La classe de précision est garantie pour les valeurs suivantes:

- les tensions comprises entre 5% de la tension primaire et la valeur maximale de cette tension qui est le produit de la tension primaire et du facteur de tension assignée ($kT \times U_n$) (voir tableau);
- pour une charge secondaire comprise entre 25% et 100% de la puissance de précision avec un facteur de puissance inductif de 0,8.

Exemple de transformateur de tension de protection

$$KT=1,9 \quad \frac{20000}{\sqrt{3}} / \frac{110}{\sqrt{3}}, 100 \text{ VA } c/3P$$

Accuracy class	Voltage error in $\pm\%$	
	between 5% of U_n and $kT \times U_n$	between 2% and 5% of U_n
3P	3	6
6P	6	12

U_n : rated voltage

kT : voltage factor

II.3. Éléments constitutifs d'un système de protection

Transformateurs de tension utilisés pour la protection conformément à la norme CEI 60044-2

L'erreur de tension maximale sera de 3% et le déphasage maximal durera 120 minutes pour une charge comprise entre $25\% \times 100 = 25 \text{ VA}$ et 100 VA avec un facteur de puissance inductif de 0,8.

La tension maximale que le TT peut supporter est:

$$1,9 \cdot \frac{20000}{\sqrt{3}} = 21,9 \text{ kV}$$

II.3. Éléments constitutifs d'un système de protection

b) Transformateurs de tension (TT)

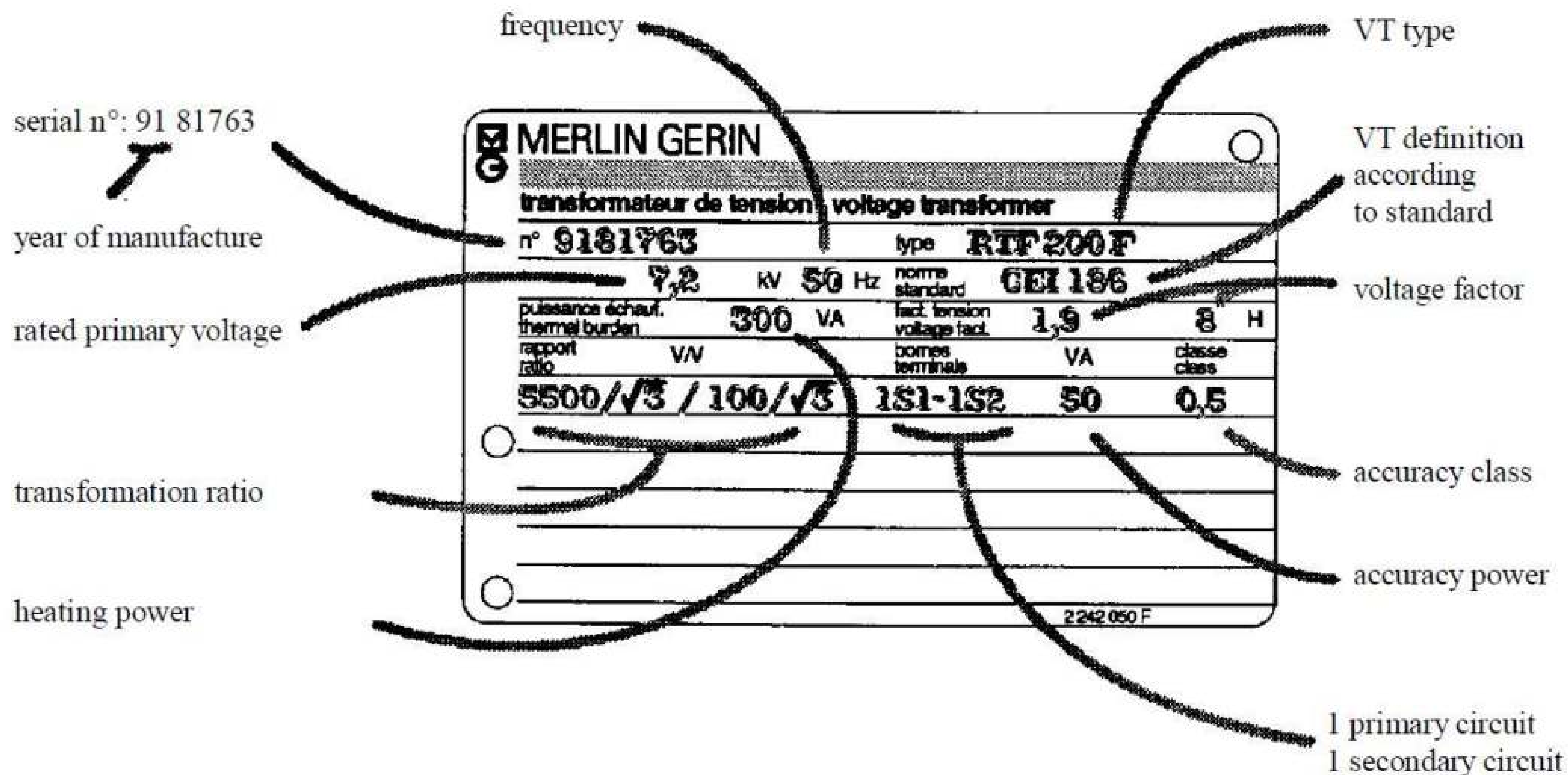
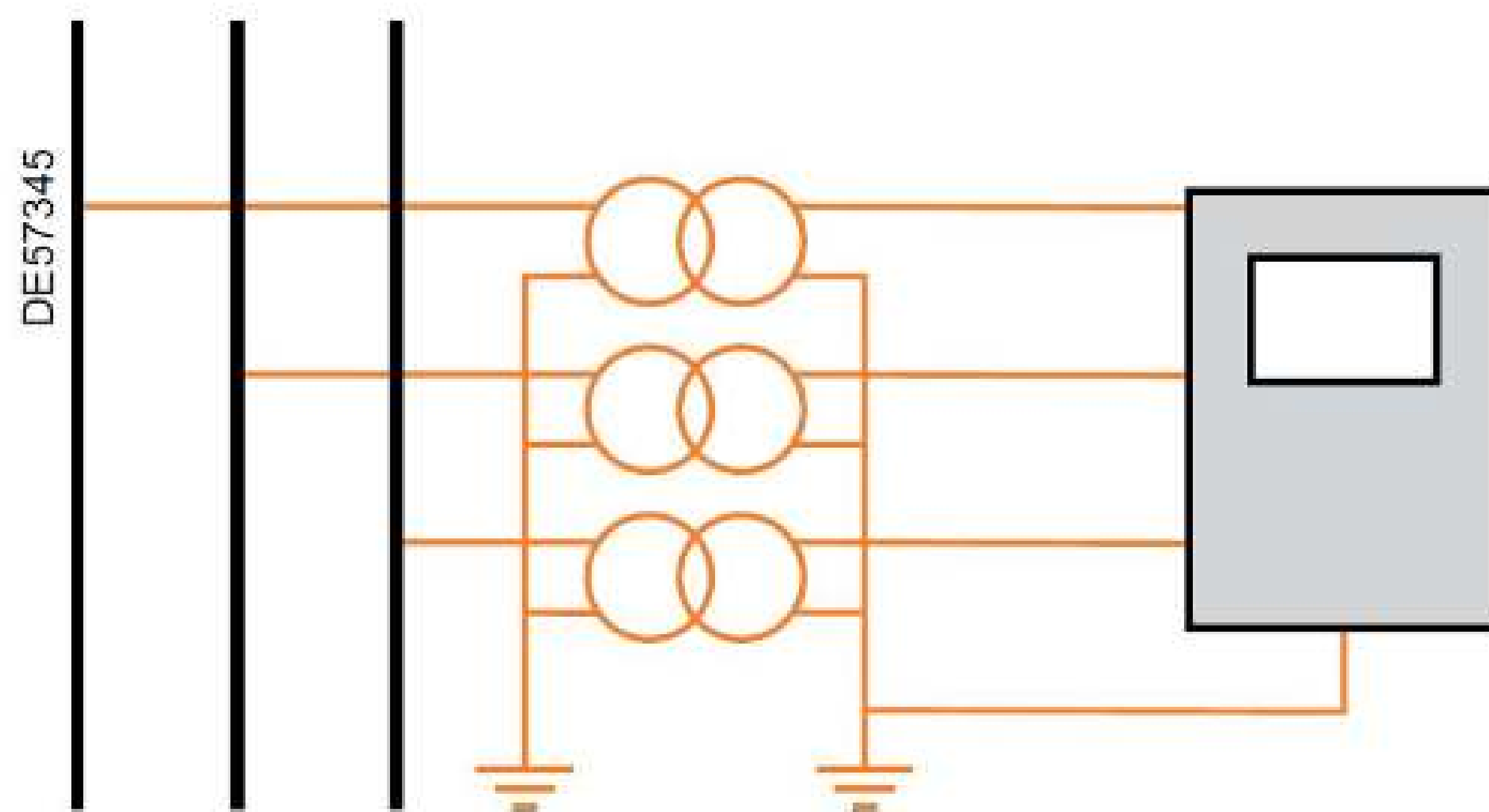


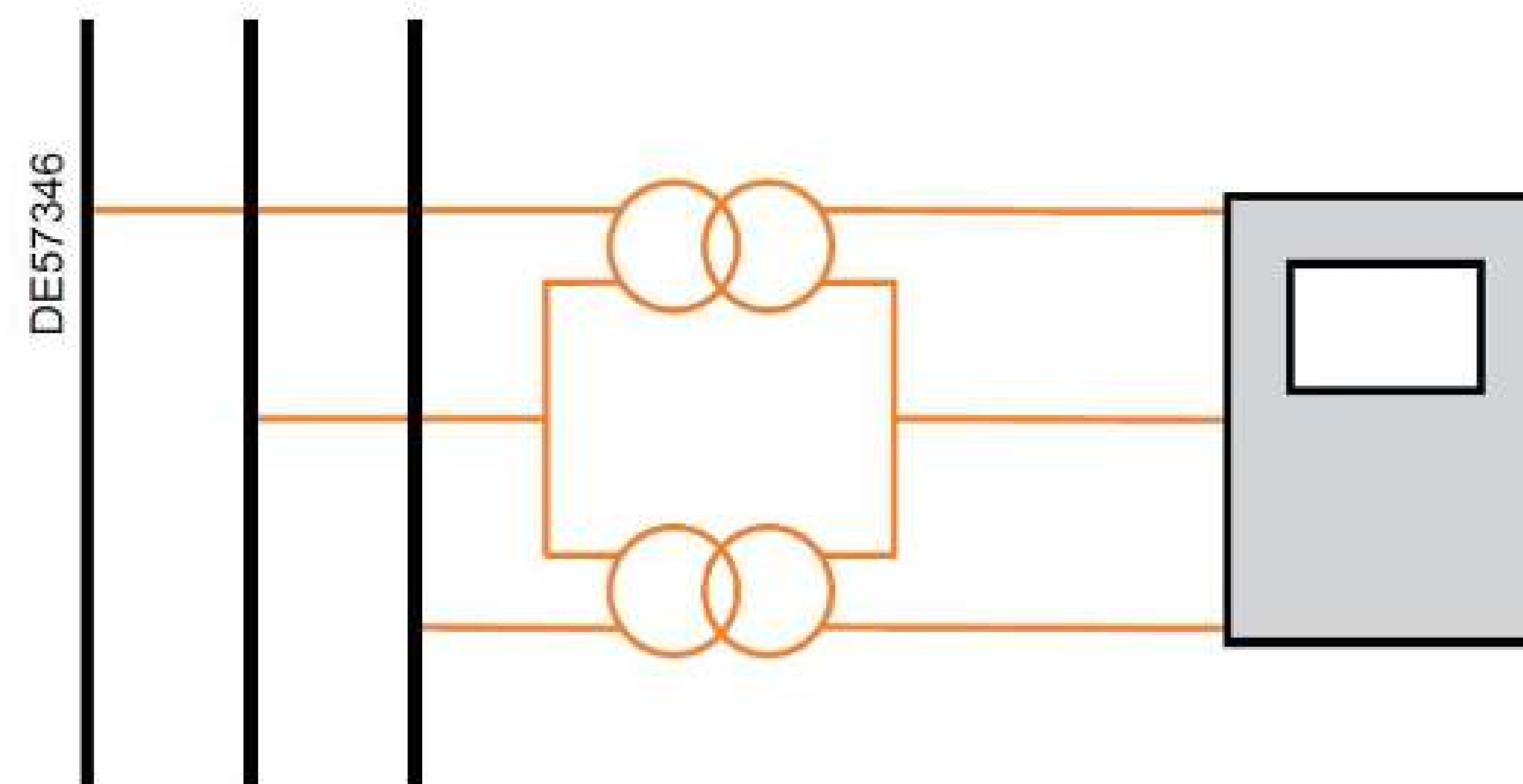
Figure. exemple de plaque signalétique d'un transformateur de Tension

II.3. Éléments constitutifs d'un système de protection

Les transformateurs de tension sont couplés soit en étoile soit en V



TT montés en étoile



TT montés en V

II.4. Qualités principales d'un système de protection

II.4.1. Rapidité

Les défauts sont donc des incidents qu'il faut éliminer le plus, vite possible, c'est le rôle des protections dont la rapidité de fonctionnement est une des performances prioritaires.

Le temps d'élimination des courts-circuits comprend deux composantes principales :

- **Le temps de fonctionnement des protections (quelques dizaines de millisecondes).**
- **Le temps d'ouverture des disjoncteurs, avec les disjoncteurs modernes (SF6 ou à vide), ces derniers sont compris entre 1 et 3 périodes.**

II.4. Qualités principales d'un système de protection

II.4.2. Sélectivité

Les protections constituent entre elles un ensemble cohérent dépendant de la structure du réseau et de son régime de neutre. Elles doivent donc être envisagées sous l'angle d'un système reposant sur le principe de sélectivité. Elle consiste à isoler le plus rapidement possible la partie du réseau affectée et uniquement cette partie, en laissant sous tension toutes les parties saines du réseau.

Différents modes de sélectivité peuvent être mis en œuvre :

- La sélectivité ampérométrique par les courants.**
- La sélectivité chronométrique par le temps.**
- La sélectivité logique par échange d'informations.**

La sélectivité a pour but d'assurer d'une part la continuité de service d'alimentation en énergie électrique et d'autre part la fonction secours entre les protections.

II.4. Qualités principales d'un système de protection

II.4.3. Sensibilité

La protection doit fonctionner dans un domaine très étendu de courants de courts-circuits entre :

- **Le courant maximal qui est fixé par le dimensionnement des installations et est donc parfaitement connu,**
- **Un courant minimal dont la valeur est très difficile à apprécier et qui correspond à un court-circuit se produisant dans des conditions souvent exceptionnelles.**

La notion de sensibilité d'une protection est fréquemment utilisée en référence au courant de court-circuit le plus faible pour lequel la protection est capable de fonctionner.

II.4. Qualités principales d'un système de protection

II.4.3. Fiabilité

Une protection a un fonctionnement correct lorsqu'elle émet une réponse à un défaut sur le réseau en tout point conforme à ce qui attendu. A l'inverse, le fonctionnement incorrect comporte deux aspects qui sont le défaut de fonctionnement et le fonctionnement intempestif.

Le défaut de fonctionnement ou non fonctionnement lorsqu'une protection qui aurait dû fonctionner n'a pas fonctionné, Le fonctionnement intempestif est un fonctionnement non justifié, soit en l'absence de défaut, soit en présence d'un défaut pour le quelle la protection n'aurait pas à fonctionner.

En effet, la fiabilité d'une protection, qui est la probabilité de ne pas avoir de fonctionnement incorrect c-à-d évité les déclenchements intempestifs, est une combinaison entre sûreté et sécurité. La sûreté est la probabilité de ne pas avoir de défaut de fonctionnement. Tandis que la sécurité est la probabilité de ne pas avoir de fonctionnement intempestif.

II.5. Fonctions de protection et leurs applications

II.5.1. Protection contre les surintensités de phase (Max de I) (code ANSI 50 ou 51)

La fonction de cette protection est de détecter les surintensités monophasées, biphasées ou triphasées. La protection est activée lorsqu'un, deux ou trois des courants concernés dépassent le seuil de réglage spécifié.

Protection à temps indépendant

Cette protection peut être temporisée et dans ce cas ne sera activée que si le courant surveillé dépasse le seuil de réglage pendant une durée au moins égale à la temporisation sélectionnée. Ce retard peut être une temporisation indépendante (définie) ou une temporisation inverse.

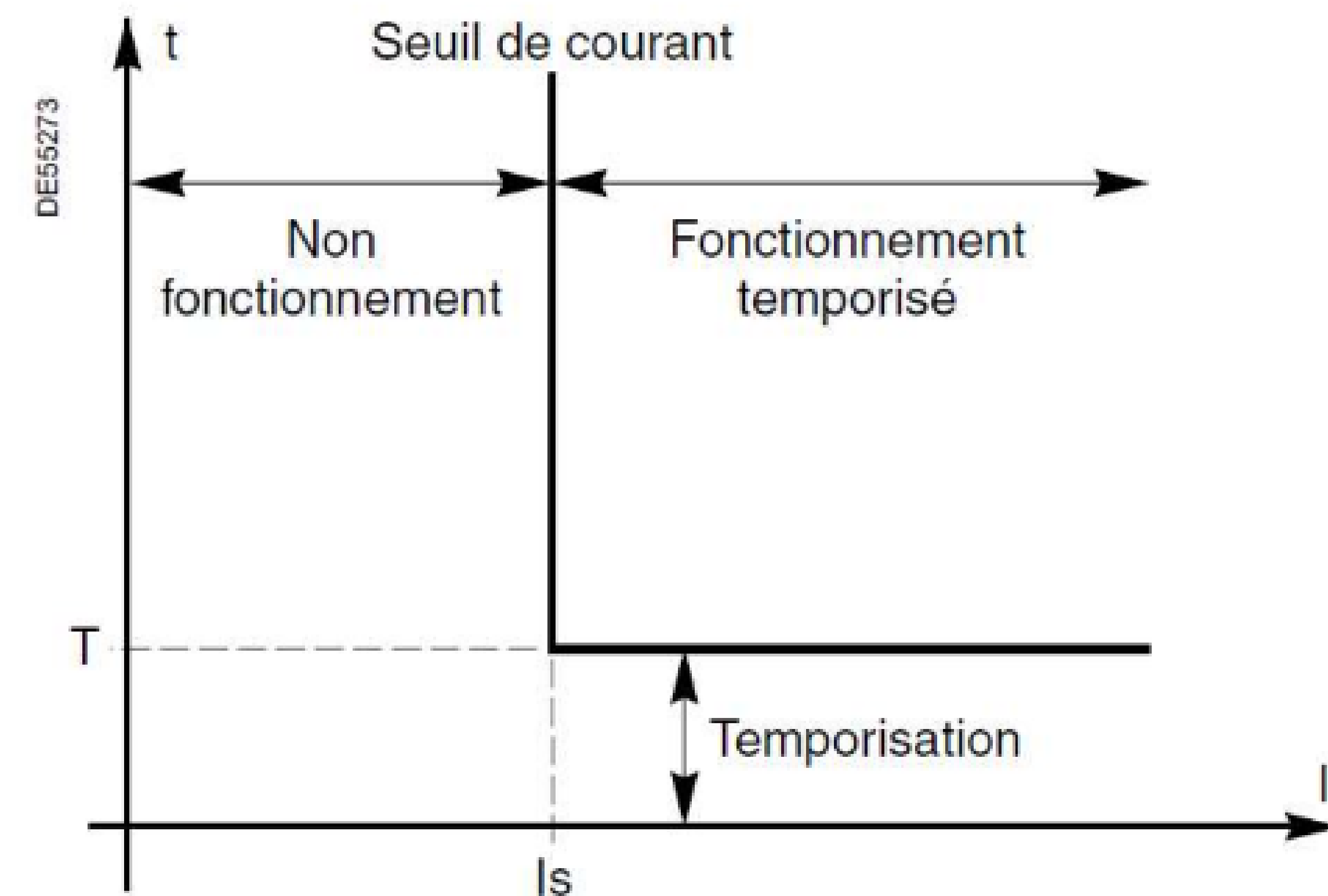


Fig. Principe du déclenchement à temps indépendant

II.5. Fonctions de protection et leurs applications

II.5.1. Protection contre les surintensités de phase (Max de I) (code ANSI 50 ou 51)

Protection à temps inverse

La temporisation dépend du rapport entre le courant mesuré et le seuil de fonctionnement. Plus le courant est élevé, plus la temporisation est courte.

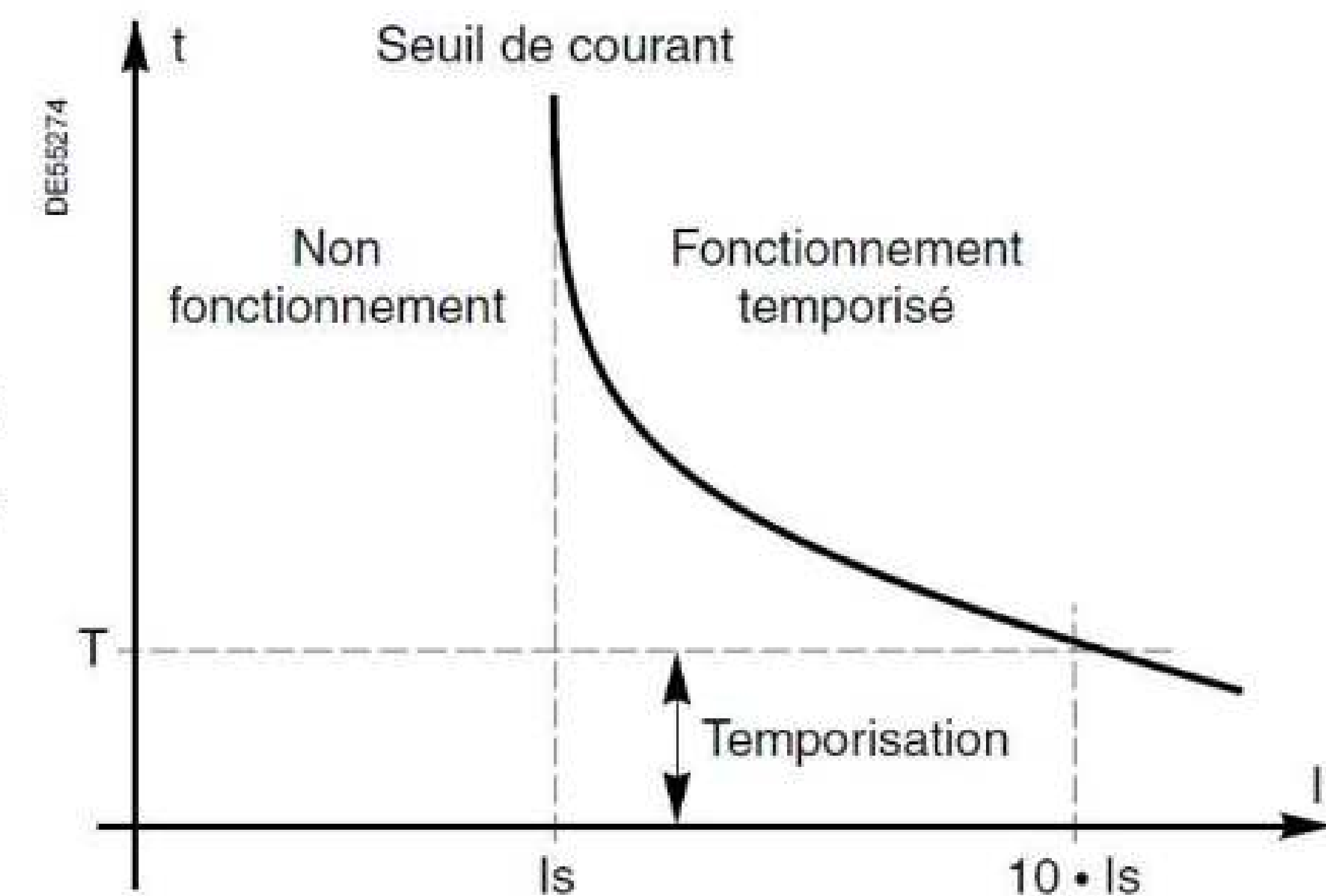


Fig. Principe du déclenchement à temps inverse

II.5. Fonctions de protection et leurs applications

II.5.2. Protection contre les défauts de terre (code ANSI 50N ou 51N, 50G ou 51G)

Cette fonction permet de protéger le réseau contre les défauts à la terre.

La protection est activée si le courant résiduel $I_{rsd} = I_1 + I_2 + I_3$ dépasse le seuil de réglage. Le courant résiduel correspond au courant traversant la terre.

La protection fonctionne de manière similaire à la protection à maximum de courant phase en ce qui concerne les courbes $t = f(I_{rsd})$.

La protection est réglée de manière à être aussi sensible que possible afin de détecter les faibles courants de défaut à la terre.

II.5. Fonctions de protection et leurs applications

II.5.2. Protection contre les défauts de terre (code ANSI 50N ou 51N, 50G ou 51G)

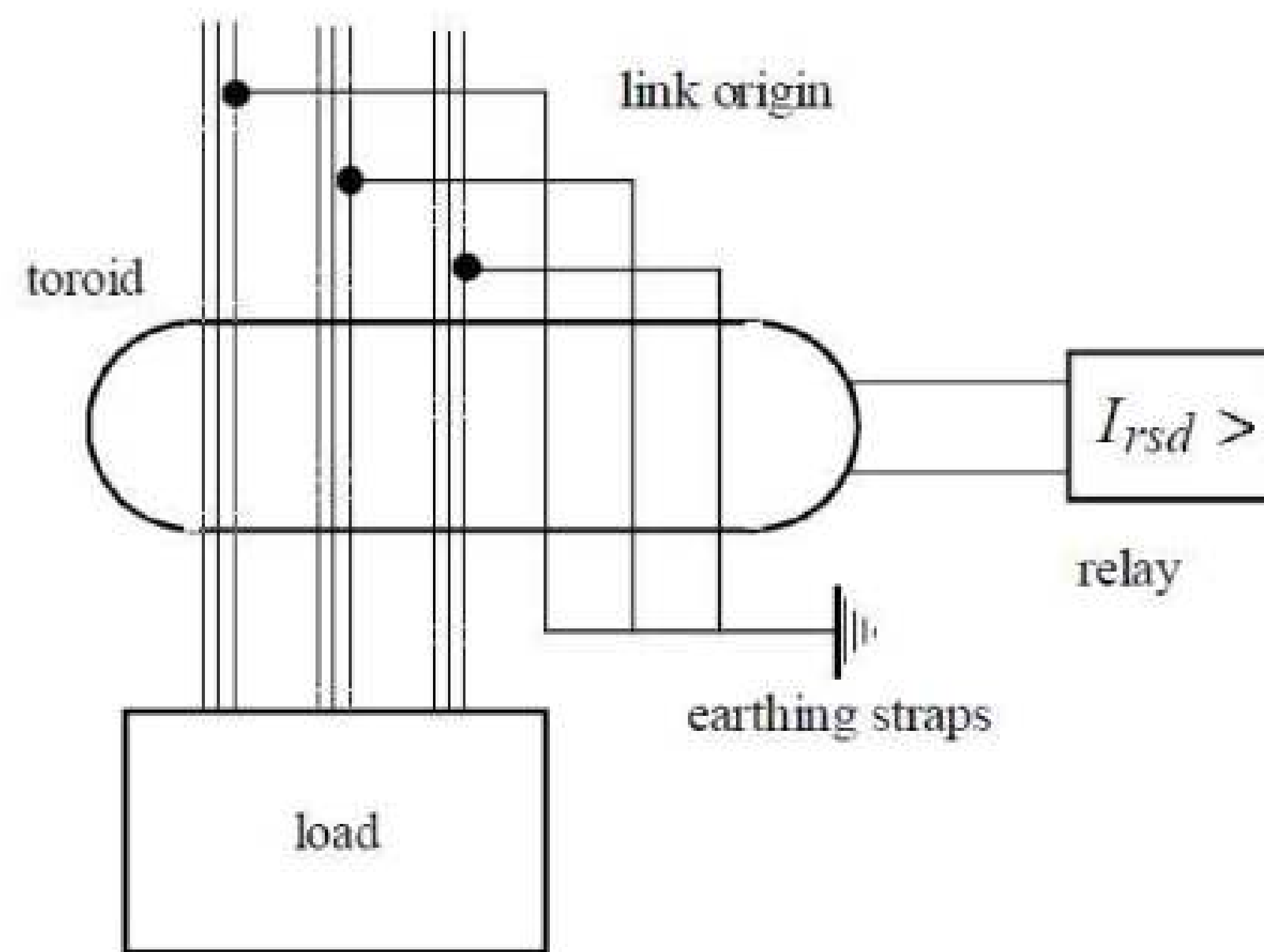


Figure. mesure du courant résiduel utilisant un tore

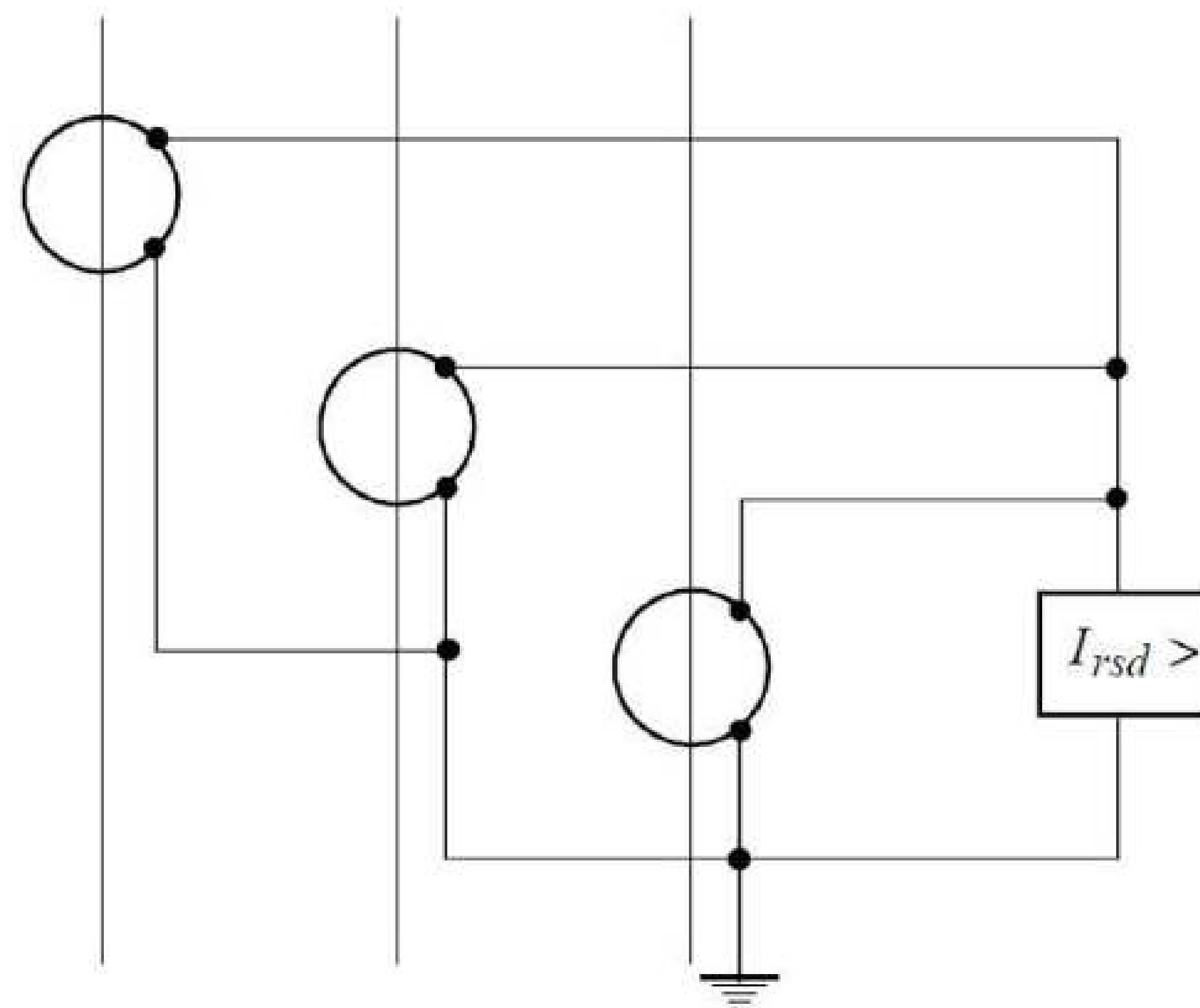


Figure. mesure du courant résiduel utilisant trois transformateurs de courant

II.5. Fonctions de protection et leurs applications

II.5.3. Protection directionnelle à maximum de courant (code ANSI 67)

Celui-ci possède une fonction de surintensité de phase associée à une fonction de détection de «direction du courant». Il est utilisé, par exemple, lorsqu'un jeu de barres est alimenté par deux sources.

II.5. Fonctions de protection et leurs applications

II.5.3. Protection directionnelle à maximum de courant (code ANSI 67)

→ circulation du courant de court-circuit

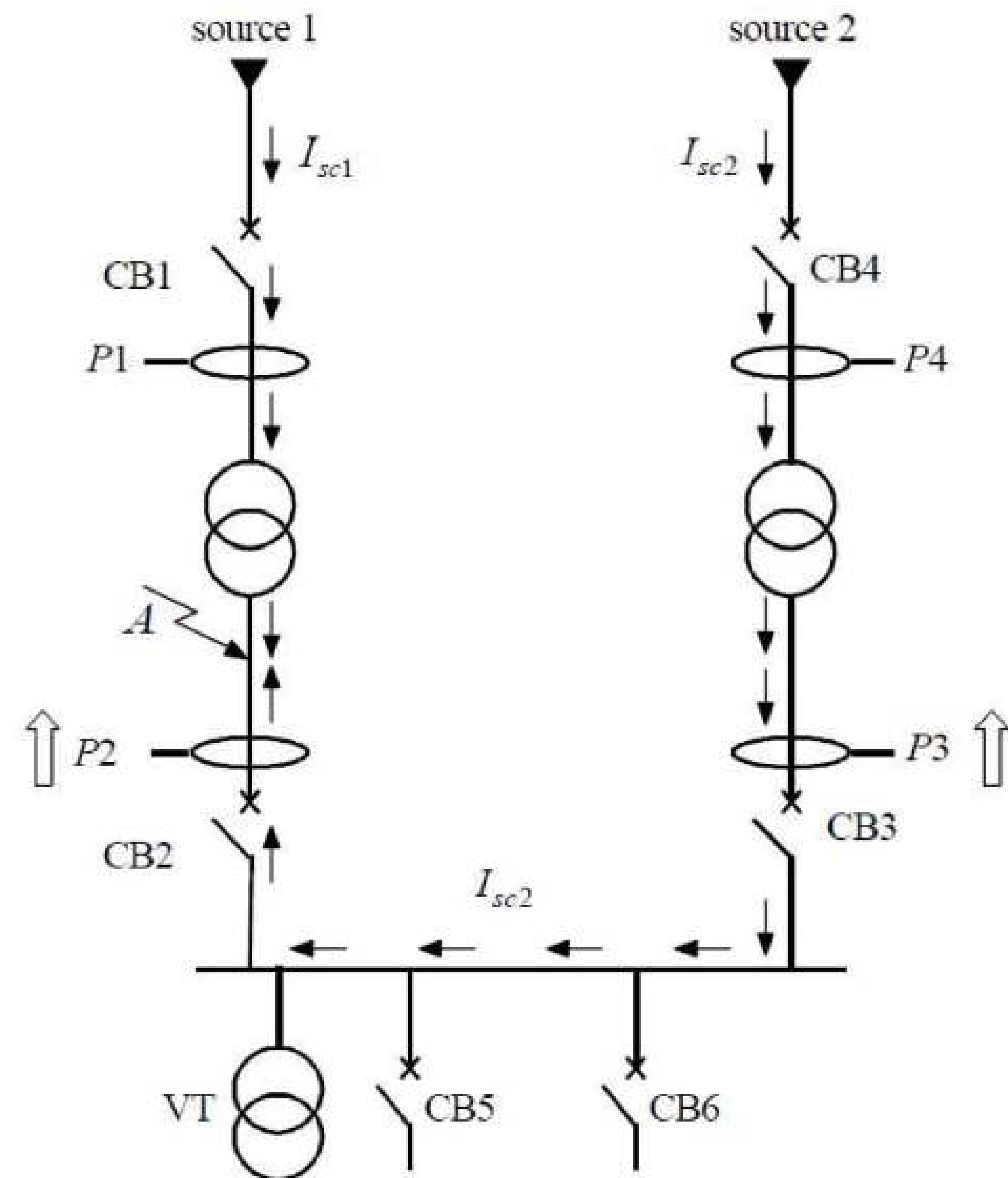
↑ direction de détection de la protection directionnelle

P1, P4: dispositifs de protection contre les surintensités

P2, P3: dispositifs de protection directionnelle

I_{sc1}: courant de court-circuit alimenté par la source 1

I_{sc2}: courant de court-circuit alimenté par la source 2



II.5. Fonctions de protection et leurs applications

II.5.3. Protection directionnelle à maximum de courant (code ANSI 67)

Lorsqu'un défaut survient en A, les deux courants de court-circuit I_{sc1} et I_{sc2} sont établis simultanément. Un courant de défaut traverse les quatre dispositifs de protection: P1, P2, P3 et P4. Désormais, pour supprimer le défaut sans interrompre l'alimentation des départs, seuls les disjoncteurs CB1 et CB2 doivent se déclencher.

Pour ce faire, des protections directionnelles à maximum de courant de phase sont installées en P2 et P3:

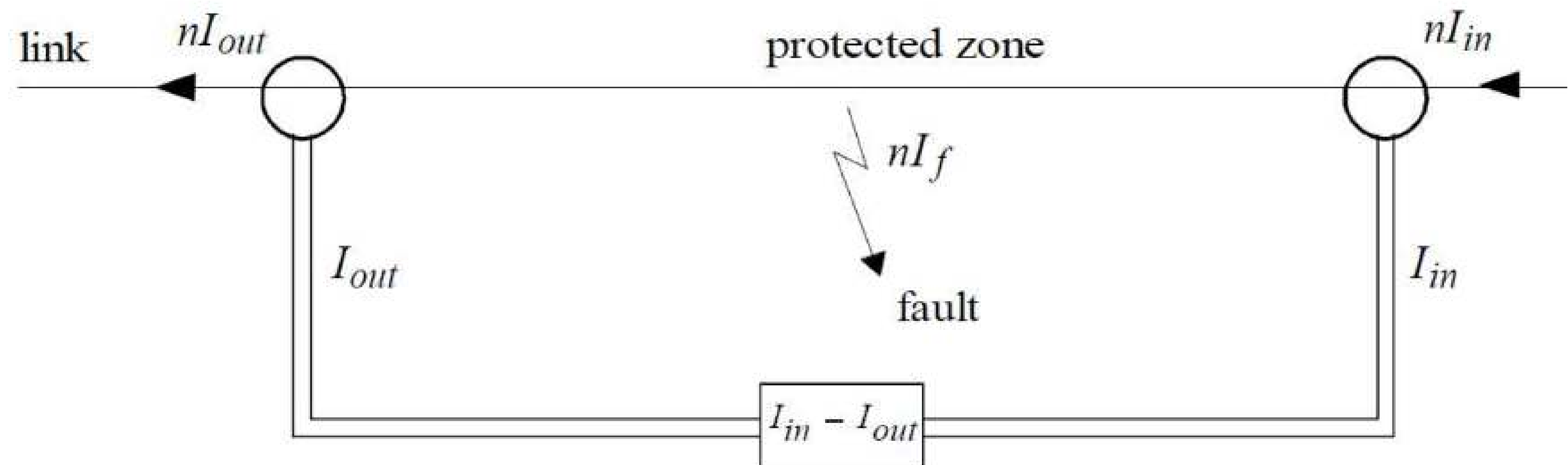
- La protection P3 n'est pas activée lorsqu'un courant circulant dans le sens opposé à sa direction de détection la traverse.
- La protection P2 est activée lorsqu'un courant circulant dans sa direction de détection la traverse. Il provoque le déclenchement du disjoncteur CB2 et le courant I_{sc2} est interrompu. Un système d'inter-déclenchement provoque le déclenchement de CB1 et le courant I_{sc1} est interrompu.
- La protection P4, temporisée, n'est pas activée.

La section défectueuse est ainsi isolée. On dit que la protection détecte le «sens du courant»; en réalité il détecte le signe de la puissance active.

II.5. Fonctions de protection et leurs applications

II.5.4. Protection différentielle

Le principe de la protection différentielle consiste à comparer deux courants d'une même phase qui sont normalement égaux. Si le courant entrant dans la zone protégée n'est pas égal au courant sortant de cette zone, les différences de courant aux extrémités de la zone protégée donnent la mesure du courant de défaut (voir Figure):



$I_{in} - I_{out} = I_f$ mesure du courant de défaut

I_{in} : mesure du courant entrant dans la zone protégée

I_{out} : mesure du courant sortant de la zone protégée

n : rapport de transformation CT

II.5. Fonctions de protection et leurs applications

II.5.4. Protection différentielle

87B	Différentielle jeu de barres	Protection triphasée contre les défauts internes de jeu de barres
87G	Différentielle générateur	Protection triphasée contre les défauts internes d'alternateurs
87L	Différentielle ligne	Protection triphasée contre les défauts internes de ligne
87M	Différentielle moteur	Protection triphasée contre les défauts internes de moteur
87T	Différentielle transformateur	Protection triphasée contre les défauts internes de transformateur

II.5. Fonctions de protection et leurs applications

Code ANSI	Libellé de la fonction	Définition
12	Survitesse	Détection de survitesse des machines tournantes
14	Sous-vitesse	Détection de sous-vitesse des machines tournantes
21	Protection de distance	Détection de mesure d'impédance
21B	Minimum d'impédance	Protection de secours des générateurs contre les courts-circuits entre phases
24	Contrôle de flux	Contrôle de surfluxage
25	Contrôle de synchronisme	Contrôle d'autorisation de couplage de deux parties de réseau
26	Thermostat	Protection contre les surcharges
27	Minimum de tension	Protection pour contrôle d'une baisse de tension
27D	Minimum de tension directe	Protection des moteurs contre un fonctionnement à tension insuffisante
27R	Minimum de tension rémanente	Contrôle de disparition de la tension entretenue par les machines tournantes après déconnexion de l'alimentation
27TN	Minimum de tension résiduelle (harmonique 3)	Détection de défaut d'isolement à la terre d'enroulements statoriques (neutre impédant)
32P	Maximum de puissance active directionnelle	Protection de contrôle de transfert maximal de puissance active
32Q	Maximum de puissance réactive directionnelle	Protection de contrôle de transfert maximal de puissance réactive
37	Minimum de courant phase	Protection triphasée contre les minima de courant
37P	Minimum de puissance active directionnelle	Protection de contrôle de transfert minimal de puissance active
37Q	Minimum de puissance réactive directionnelle	Protection de contrôle de transfert minimal de puissance réactive
38	Surveillance de température de paliers	Protection contre les échauffements anormaux des paliers des machines tournantes
40	Perte d'excitation	Protection des machines synchrones contre défaut ou perte d'excitation
46	Maximum de composante inverse	Protection contre les déséquilibres des courants des phases
47	Maximum de tension inverse	Protection de tension inverse et détection du sens de rotation inverse de machine tournante
48 - 51LR	Démarrage trop long et blocage rotor	Protection des moteurs contre le démarrage en surcharge ou sous tension réduite, et pour charge pouvant se bloquer

II.5. Fonctions de protection et leurs applications

49	Image thermique	Protection contre les surcharges
49T	Sonde de température	Protection contre les échauffements anormaux des enroulements des machines
50	Maximum de courant phase instantanée	Protection triphasée contre les courts-circuits entre phases
50BF	Défaillance disjoncteur	Protection de contrôle de la non-ouverture du disjoncteur après ordre de déclenchement
50N ou 50G	Maximum de courant terre instantanée	Protection contre les défauts à la terre : 50N : courant résiduel calculé ou mesuré par 3 TC 50G : courant résiduel mesuré directement par un seul capteur (TC ou tore)
50V	Maximum de courant phase à retenue de tension instantanée	Protection triphasée contre les courts-circuits entre phases, à seuil dépendant de la tension
50/27	Mise sous tension accidentelle générateur	Détection de mise sous tension accidentelle de générateur
51	Maximum de courant phase temporisée	Protection triphasée contre les surcharges et les courts-circuits entre phases
51N ou 51G	Maximum de courant terre temporisée	Protection contre les défauts à la terre : 51N : courant résiduel calculé ou mesuré par 3 TC 51G : courant résiduel mesuré directement par un seul capteur (TC ou tore)
51V	Maximum de courant phase à retenue de tension temporisée	Protection triphasée contre les courts-circuits entre phases, à seuil dépendant de la tension
59	Maximum de tension	Protection de contrôle d'une tension trop élevée ou suffisante
59N	Maximum de tension résiduelle	Protection de détection de défaut d'isolement
63	Pression	Détection de défaut interne transformateur (gaz, pression)
64REF	Différentielle de terre restreinte	Protection contre les défauts à la terre d'enroulements triphasés couplés en étoile avec neutre relié à la terre
64G	100 % stator générateur	Détection de défauts d'isolement à la terre des enroulements statoriques (réseau à neutre impédant)
66	Limitation du nombre de démarrages	Protection contrôlant le nombre de démarrages des moteurs
67	Maximum de courant phase directionnelle	Protection triphasée contre les courts-circuits selon le sens d'écoulement du courant
67N/67NC	Maximum de courant terre directionnelle	Protection contre les défauts à la terre selon le sens d'écoulement du courant (NC : Neutre Compensé)

II.5. Fonctions de protection et leurs applications

78	Saut de vecteur	Protection de découplage à saut de vecteur
78PS	Perte de synchronisme (pole slip)	Détection de perte de synchronisme des machines synchrones en réseau
79	Réenclencheur	Automatisme de refermeture de disjoncteur après déclenchement sur défaut fugitif de ligne
81H	Maximum de fréquence	Protection contre une fréquence anormalement élevée
81L	Minimum de fréquence	Protection contre une fréquence anormalement basse
81R	Dérivée de fréquence (rocof)	Protection de découplage rapide entre deux parties de réseau
87B	Différentielle jeu de barres	Protection triphasée contre les défauts internes de jeu de barres
87G	Différentielle générateur	Protection triphasée contre les défauts internes d'alternateurs
87L	Différentielle ligne	Protection triphasée contre les défauts internes de ligne
87M	Différentielle moteur	Protection triphasée contre les défauts internes de moteur
87T	Différentielle transformateur	Protection triphasée contre les défauts internes de transformateur

II.6. Mode de sélectivité

Les protections constituent entre elles un ensemble cohérent dépendant de la structure du réseau et de son régime de neutre. Elles doivent donc être envisagées sous l'angle d'un système reposant sur le principe de sélectivité : il consiste à isoler le plus rapidement possible la partie du réseau affectée par un défaut et uniquement cette partie, en laissant sous tension toutes les parties saines du réseau.

Différents moyens peuvent être mis en œuvre pour assurer une bonne sélectivité dans la protection d'un réseau électrique :

- sélectivité chronométrique par le temps,**
- sélectivité ampèremétrique par les courants,**
- sélectivité par échange d'informations, dite sélectivité logique,**
- sélectivité par utilisation de protections directionnelles,**
- sélectivité par utilisation de protections différentielles,**
- sélectivités combinées afin d'assurer une meilleure performance globale (technique et économique), ou un niveau de secours (back-up).**

II.6. Mode de sélectivité

Les protections constituent entre elles un ensemble cohérent dépendant de la structure du réseau et de son régime de neutre. Elles doivent donc être envisagées sous l'angle d'un système reposant sur le principe de sélectivité : il consiste à isoler le plus rapidement possible la partie du réseau affectée par un défaut et uniquement cette partie, en laissant sous tension toutes les parties saines du réseau.

Différents moyens peuvent être mis en œuvre pour assurer une bonne sélectivité dans la protection d'un réseau électrique :

- sélectivité chronométrique par le temps,**
- sélectivité ampèremétrique par les courants,**
- sélectivité par échange d'informations, dite sélectivité logique,**
- sélectivité par utilisation de protections directionnelles,**
- sélectivité par utilisation de protections différentielles,**
- sélectivités combinées afin d'assurer une meilleure performance globale (technique et économique), ou un niveau de secours (back-up).**

II.6. Mode de sélectivité

II.6.1. Sélectivité chronométrique

Il consiste à donner des temporisations différentes aux protections à maximum courant échelonnées le long du réseau.

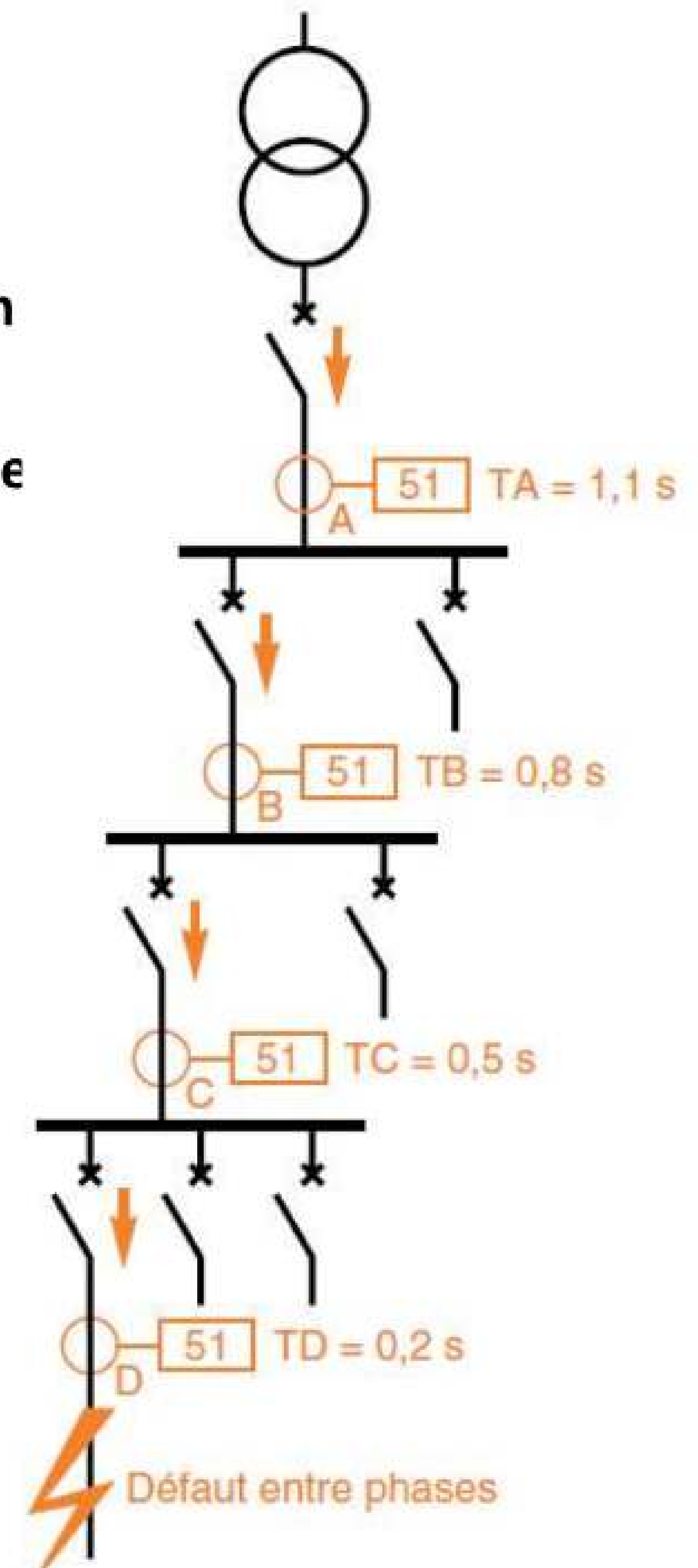
Ces temporisations sont d'autant plus longues que le relais est plus proche de source.

Mode de fonctionnement

sur le schéma , le défaut représenté est vu par toutes les protections (en A, B, C, et D). La protection temporisée D ferme ses contacts plus rapidement que celle installée en C, elle-même plus rapide que celle installée en B...

Après l'ouverture du disjoncteur D et la disparition du courant de défaut, les protections A, B, C qui ne sont plus sollicitées, reviennent à leur position de veille.

La différence des temps de fonctionnement ΔT entre deux protections successives est l'intervalle de sélectivité.



II.6. Mode de sélectivité

II.6.1. Sélectivité chronométrique

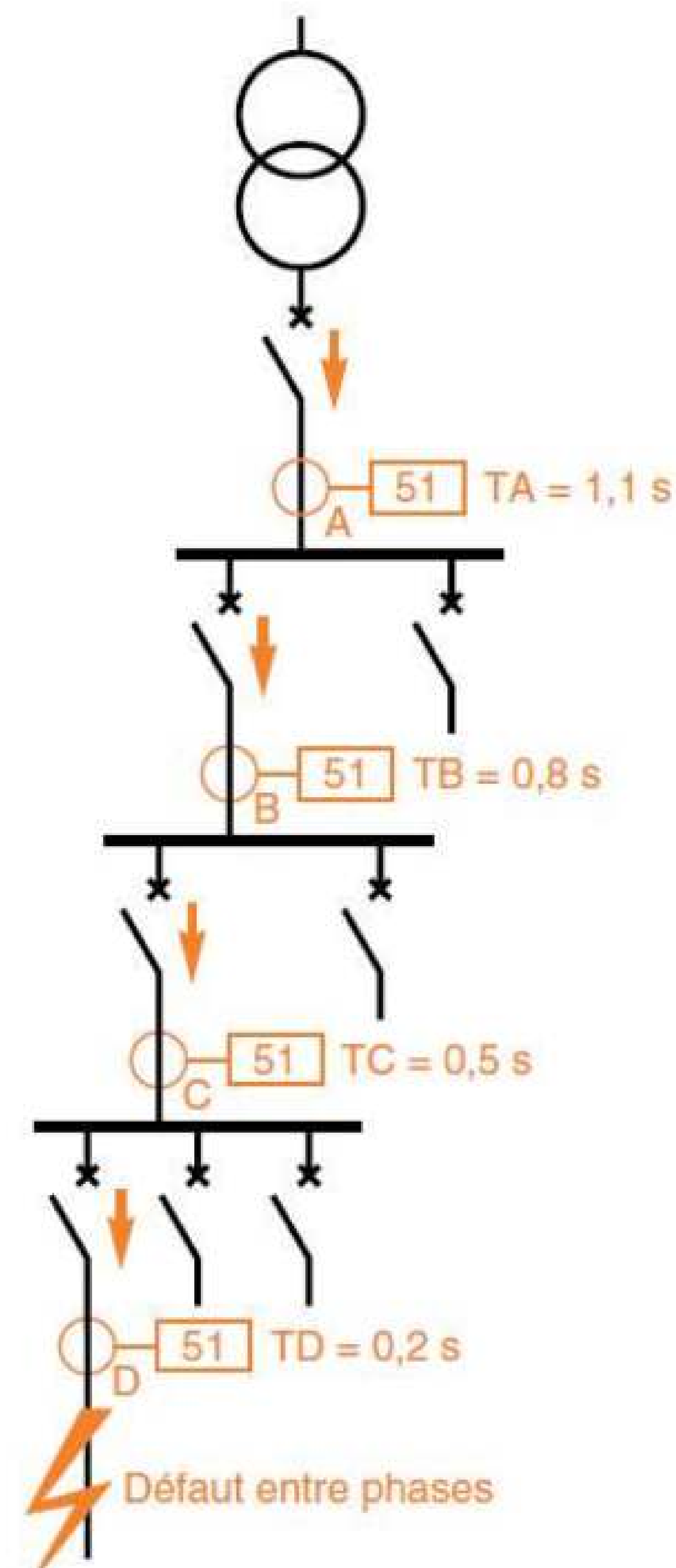
Avantages

Ce système de sélectivité a deux avantages :

- il assure son propre secours ; par exemple si la protection D est défailante, la protection C est activée ΔT plus tard,
- il est simple.

Inconvénients

Par contre, lorsque le nombre de relais en cascade est grand, du fait que la protection située le plus en amont a la temporisation la plus longue, on aboutit à un temps d'élimination de défaut prohibitif et incompatible avec la tenue des matériels au courant de court-circuit, ou avec les impératifs extérieurs d'exploitation, (raccordement au réseau électrique d'un distributeur par exemple).



II.6. Mode de sélectivité

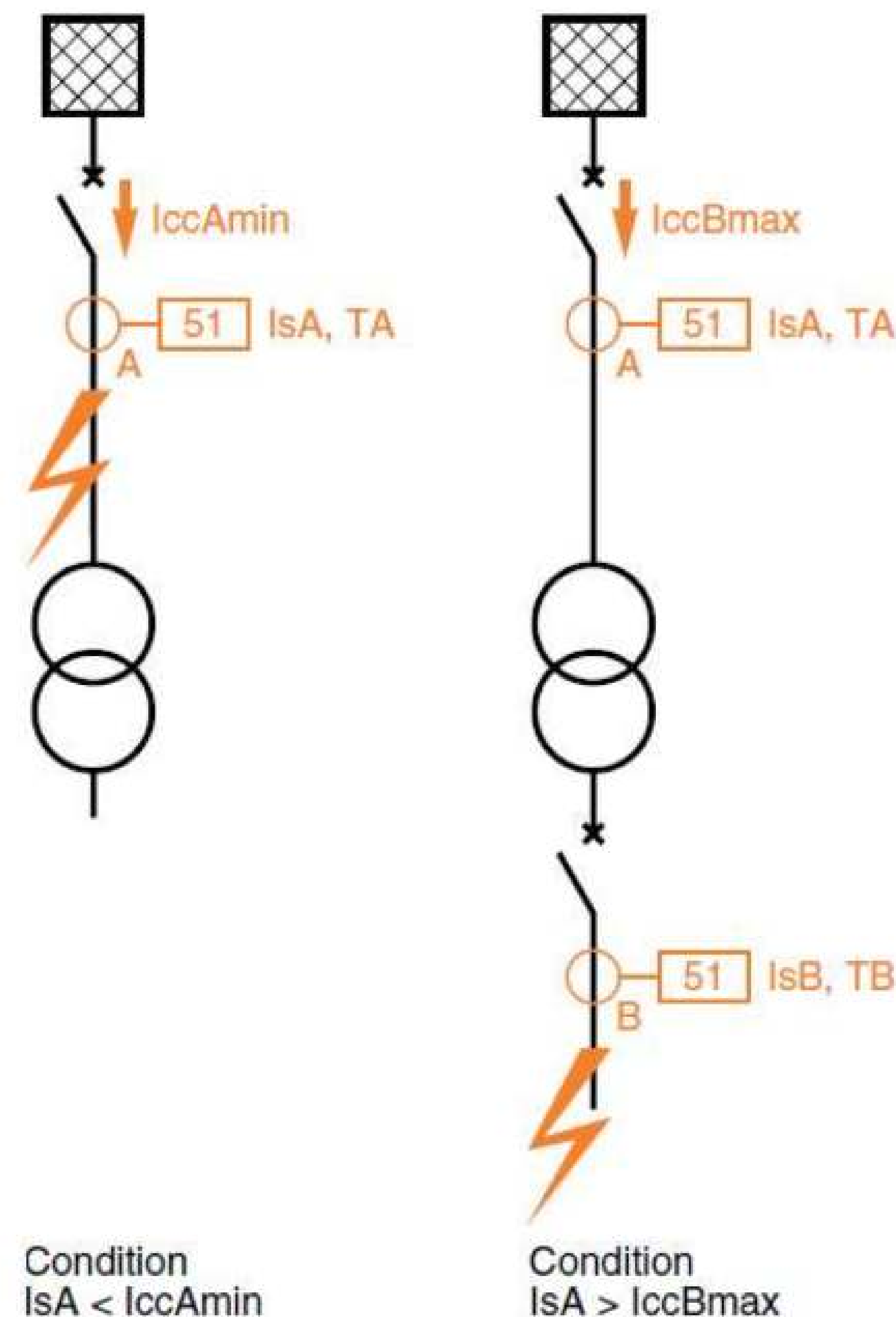
II.6.2. Sélectivité ampèremétrique

Il est basé sur le fait que dans un réseau, le courant de défaut est d'autant plus faible que le défaut est plus éloigné de la source.

Mode de fonctionnement

Une protection ampèremétrique est disposée au départ de chaque tronçon :

son seuil est réglé à une valeur inférieure à la valeur de court-circuit minimal provoqué par un défaut sur la section surveillée, et supérieure à la valeur maximale du courant provoqué par un défaut situé en aval (au-delà de la zone surveillée).



II.6. Mode de sélectivité

II.6.2. Sélectivité ampèremétrique

Avantages

Ainsi réglée, chaque protection ne fonctionne que pour les défauts situés immédiatement en aval de sa position, à l'intérieur de la zone surveillée ;

elle est insensible aux défauts apparaissant au-delà.

Pour des tronçons de lignes séparés par un transformateur, ce système est avantageusement utilisé car simple, de coût réduit et rapide (déclenchement sans retard).

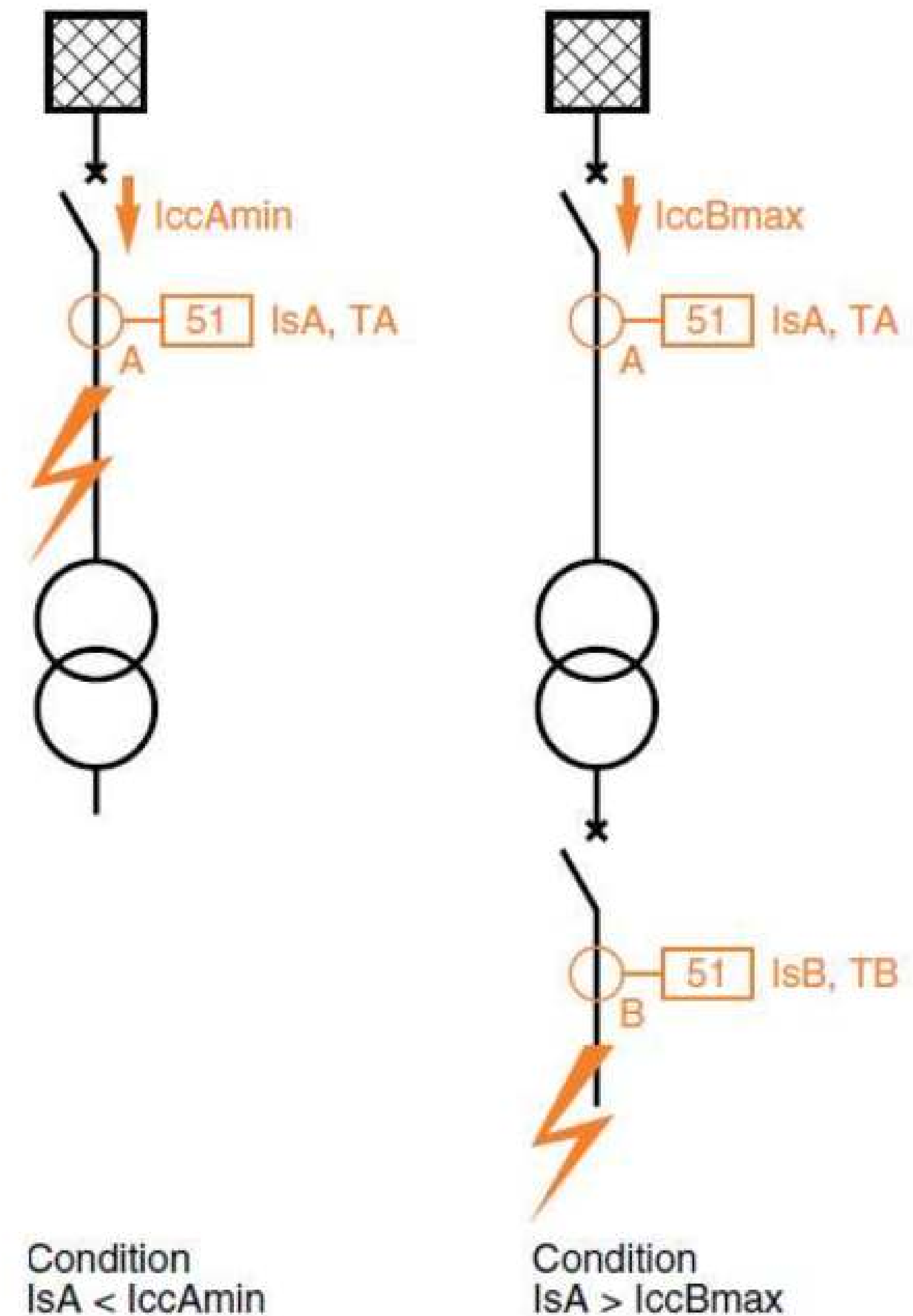
Un exemple est donné (fig.) :

$$I_{ccBmax} < I_{sA} < I_{ccAmin}$$

I_{sA} = intensité de réglage

I_{ccB} image au primaire, du courant de CC maximum au secondaire.

Les temporisations TA et TB sont indépendantes, et TA peut être plus courte que TB.



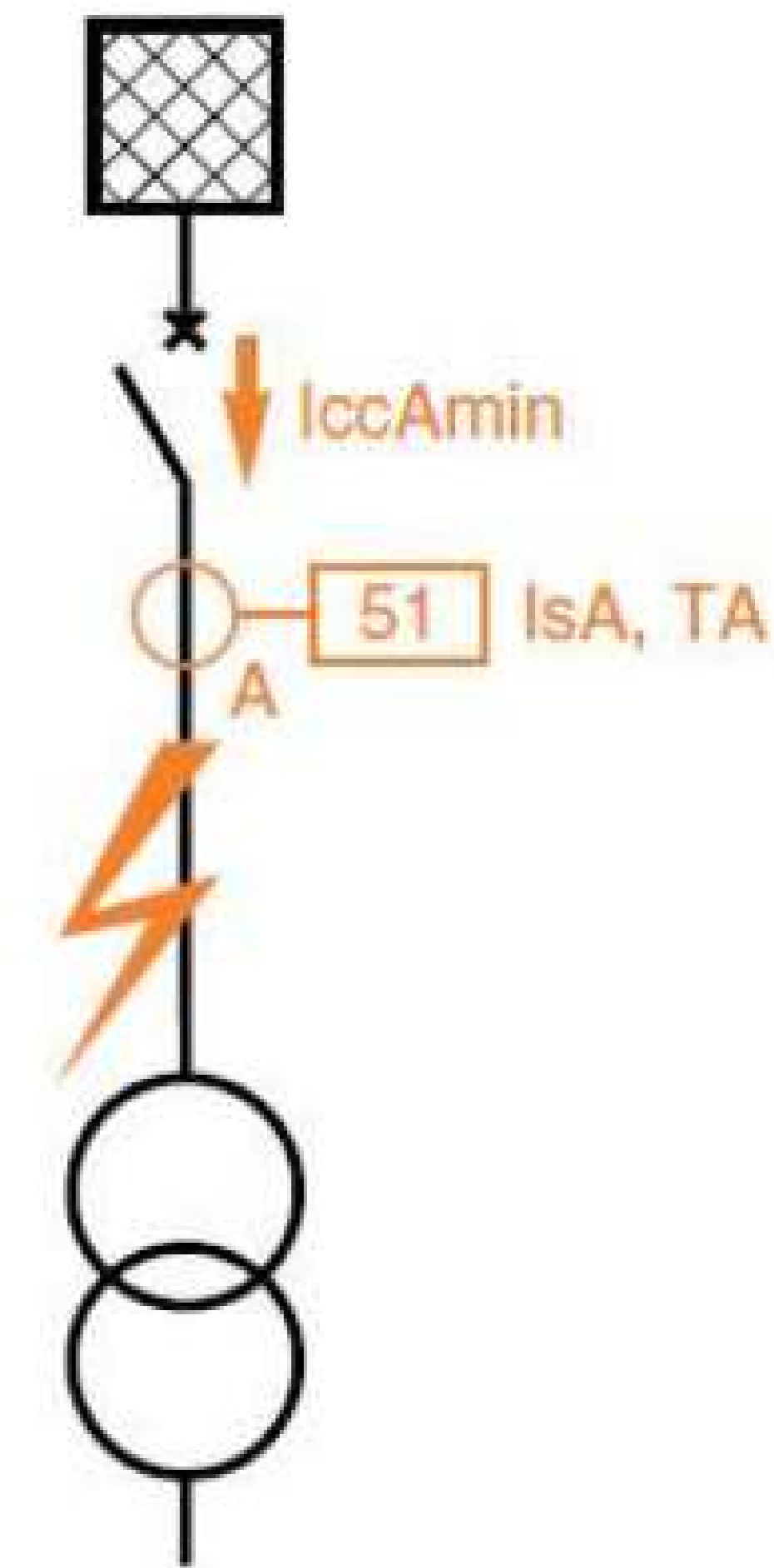
II.6. Mode de sélectivité

II.6.2. Sélectivité ampèremétrique

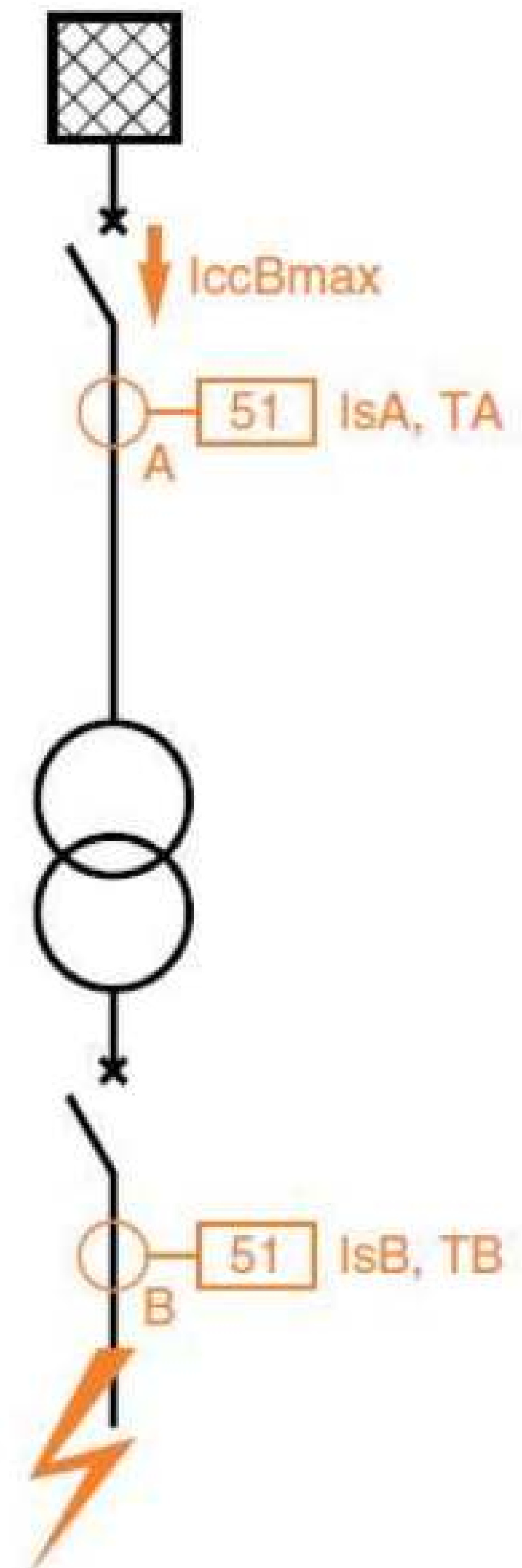
Inconvénients

La protection située en amont (A) n'assure pas le secours de la protection située en aval (B).

De plus, en pratique, il est difficile de définir les réglages de deux protections en cascade, tout en assurant une bonne sélectivité, lorsque le courant ne décroît pas de façon notable entre deux zones voisines ; ceci est le cas en moyenne tension, sauf pour des tronçons avec transformateur.



Condition
 $I_{sA} < I_{ccAmin}$



Condition
 $I_{sA} > I_{ccBmax}$

II.6. Mode de sélectivité

II.6.2. Sélectivité ampèremétrique

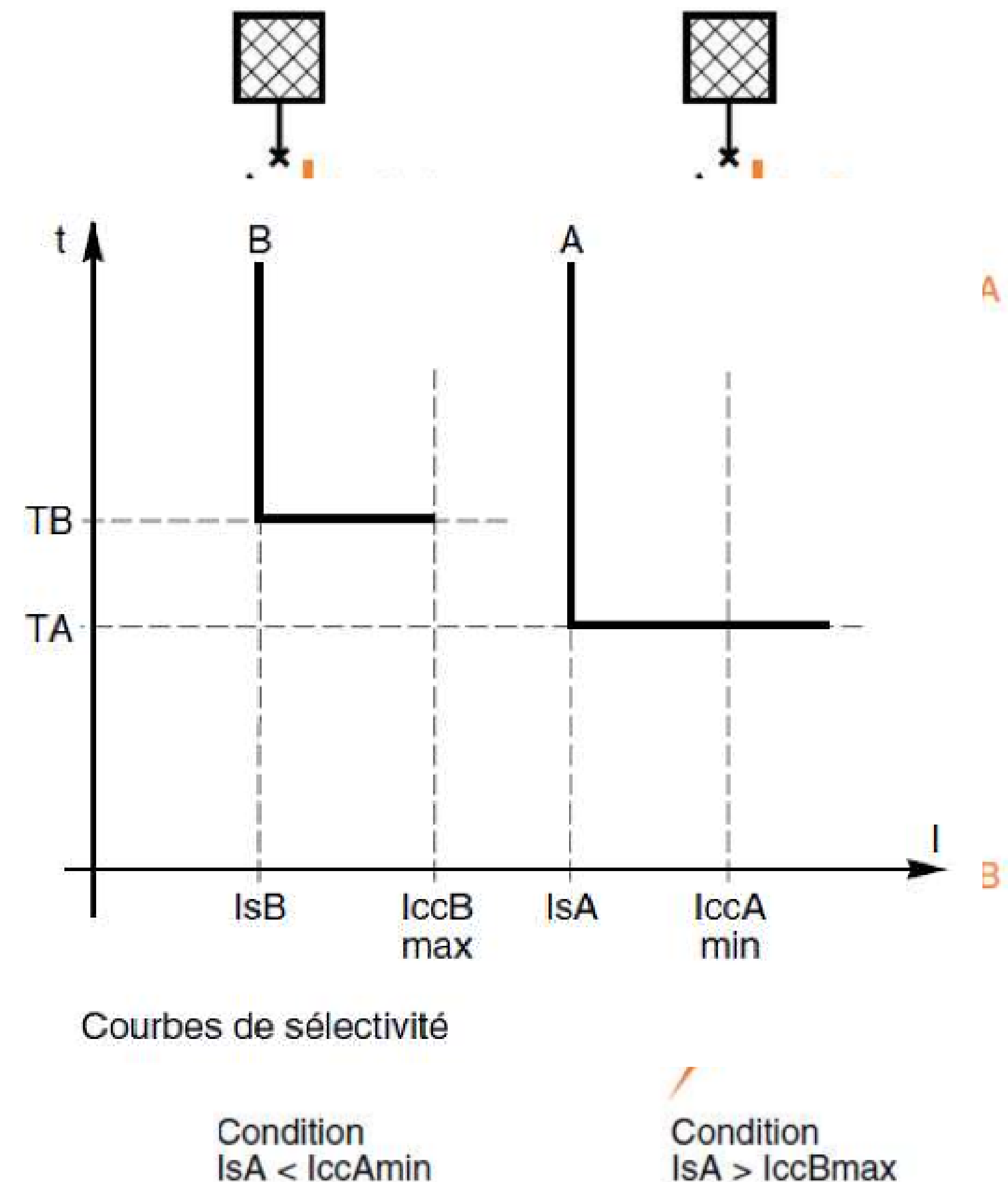
Application

L'exemple suivant concerne la protection ampèremétrique d'un transformateur entre tronçons de câble.

Le réglage I_s de la protection à maximum de c vérifie la relation :

$$1,25 I_{ccBmax} < I_{sA} < 0,8 I_{ccAmin}$$

La sélectivité entre les deux protections est assurée



II.6. Mode de sélectivité

II.6.3. Sélectivité logique

Ce système a été développé pour remédier aux inconvénients de la sélectivité chronométrique.

Ce principe est utilisé lorsque l'on souhaite obtenir un temps court d'élimination de défaut (fig.).

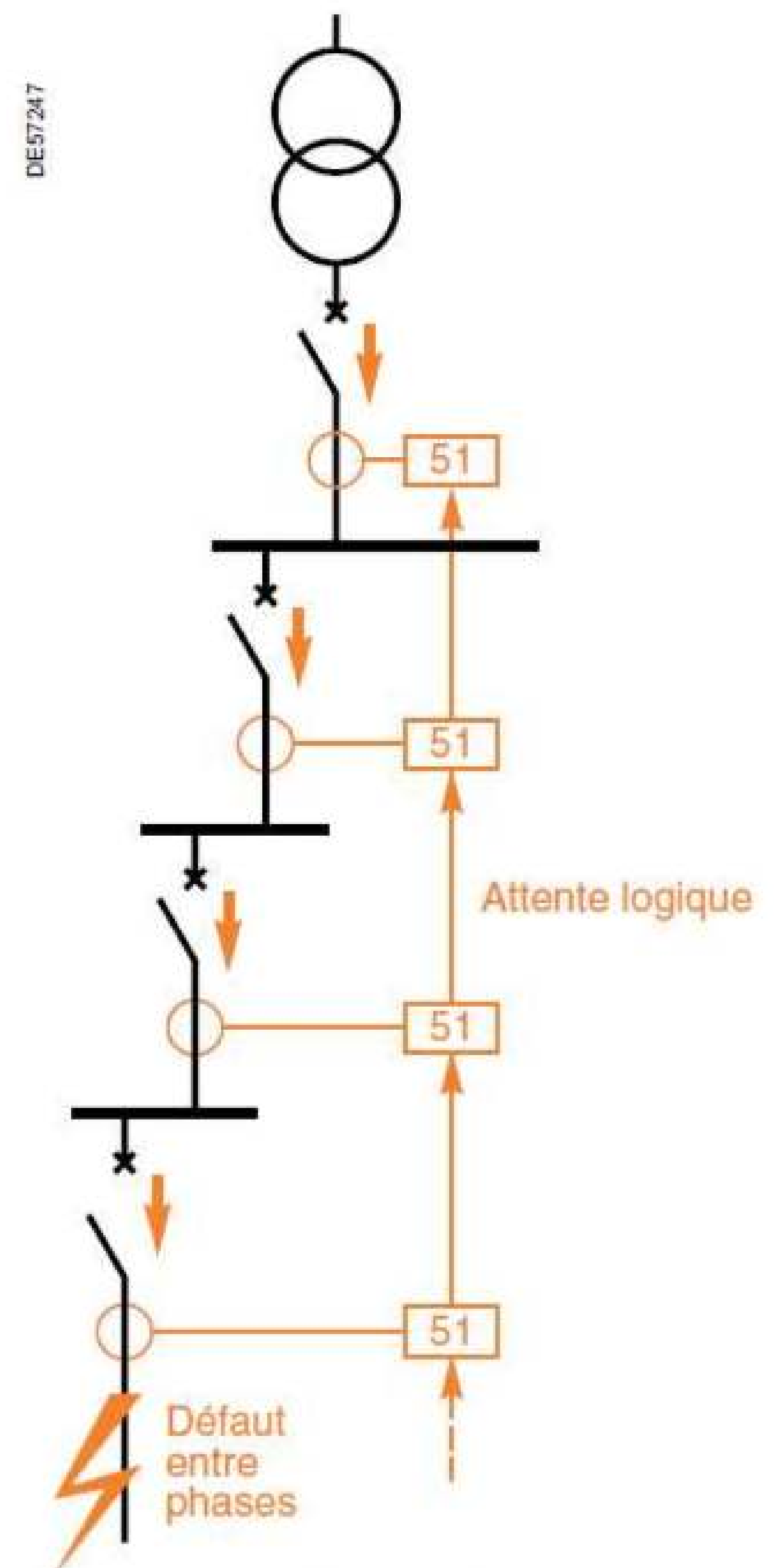


Fig. 1 : principe de la sélectivité logique

II.6. Mode de sélectivité

II.6.3. Sélectivité logique

Mode de fonctionnement

L'échange d'informations logiques entre protections successives permet la suppression des intervalles de sélectivité, et donc de réduire considérablement le retard de déclenchement des disjoncteurs situés les plus près de la source.

En effet, dans un réseau en antenne, les protections situées en amont du point de défaut sont sollicitées, celles en aval ne le sont pas ; cela permet de localiser sans ambiguïté le point de défaut et le disjoncteur à commander.

Chaque protection sollicitée par un défaut envoie :

- un ordre d'attente logique à l'étage amont (ordre d'augmentation de la temporisation propre du relais amont),
- un ordre de déclenchement au disjoncteur associé sauf s'il a lui-même reçu un ordre d'attente logique de l'étage aval.

Un déclenchement temporisé est prévu en secours.

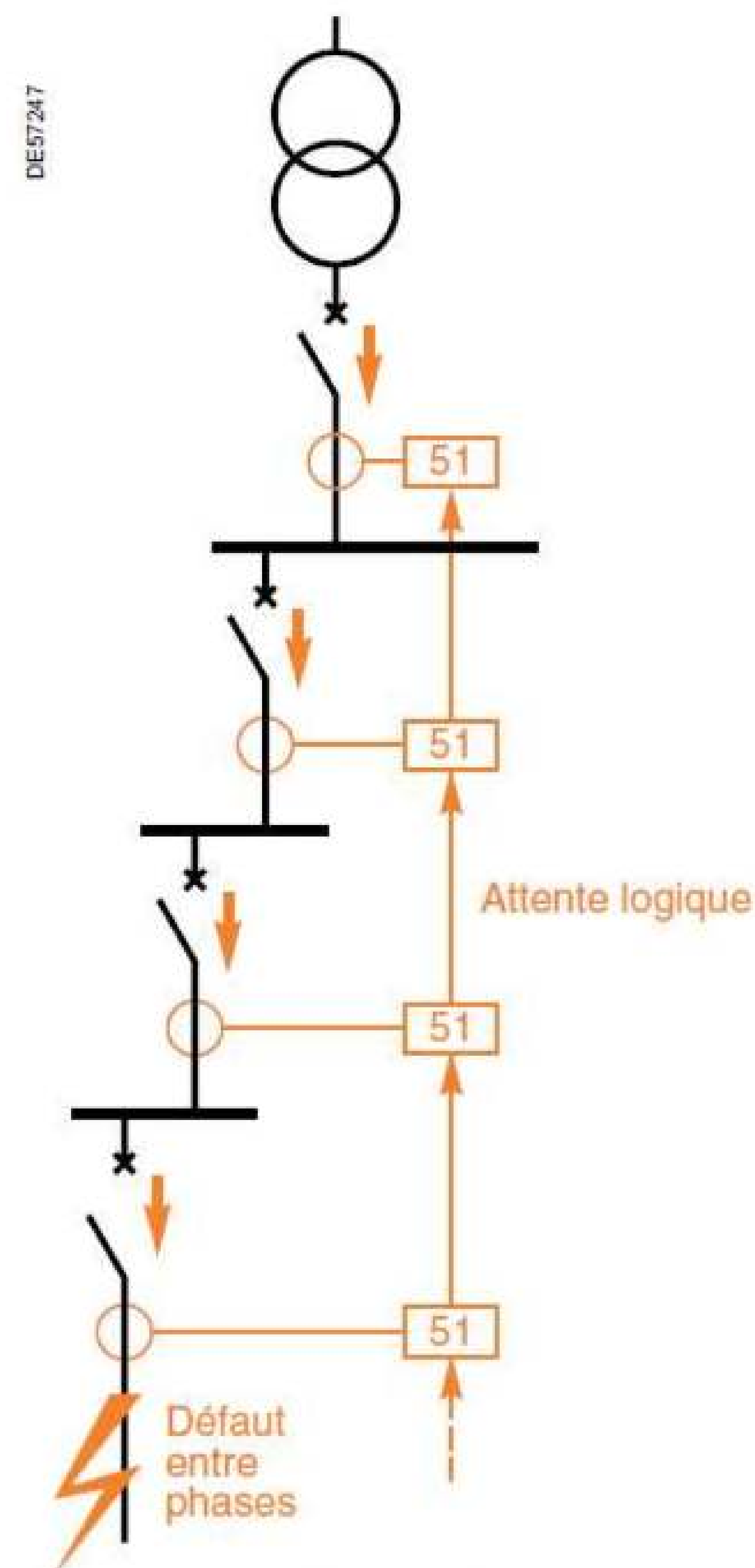


Fig. 1 : principe de la sélectivité logique

II.6. Mode de sélectivité

II.6.3. Sélectivité logique

Mode de fonctionnement

Ce principe est illustré sur la figure 2 :

- ✓ à l'apparition d'un défaut à l'aval de B, la protection en B bloque la protection en A,
- ✓ seule la protection en B provoque le déclenchement après TB, si toutefois elle n'a pas reçu d'ordre d'attente,
- ✓ la durée de l'ordre d'attente pour la protection en A est limitée à $TB + T3$, avec $T3$ le temps d'ouverture et de coupure d'arc du disjoncteur B (typiquement 200 ms),
- ✓ ainsi en cas de non déclenchement du disjoncteur B défaillant, la protection A donne l'ordre de déclenchement en $TB + T3$,
- ✓ à l'apparition d'un défaut entre A et B, la protection A déclenche après TA.

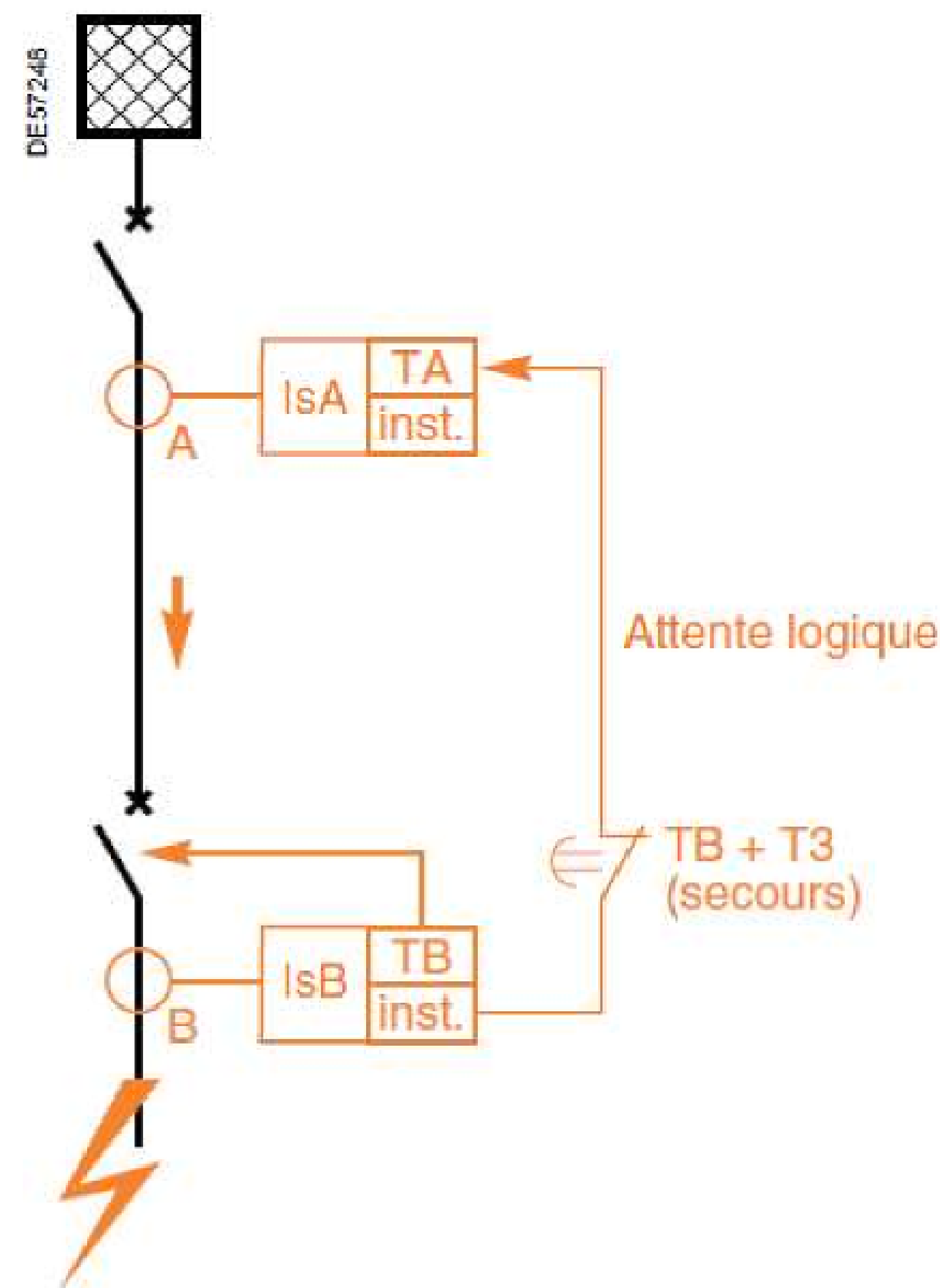


Fig. 2 : fonctionnement d'une sélectivité logique

II.6. Mode de sélectivité

II.6.3. Sélectivité logique

Avantages

Le temps de déclenchement est indépendant de la position du défaut dans la cascade de sélectivité, et du nombre de protections en cascade.

Ainsi est-il possible d'obtenir la sélectivité entre une protection amont de temporisation faible et une protection aval de temporisation élevée ; on peut par exemple prévoir une temporisation plus réduite à la source que près des récepteurs. De plus, ce système intègre par conception un secours.

Inconvénients

Ce dispositif nécessite la transmission des signaux logiques entre les différents étages de protection, donc l'installation de filerie supplémentaire ; cette contrainte est forte lorsque les protections sont éloignées, par exemple dans le cas de liaisons longues (plusieurs centaines de mètres).

Aussi peut-on tourner la difficulté en faisant de la combinaison de fonctions : sélectivité logique au niveau de tableaux proches, et sélectivité chronométrique entre zone éloignées (se reporter au chapitre sélectivités combinées logique + chronométrique).

Application

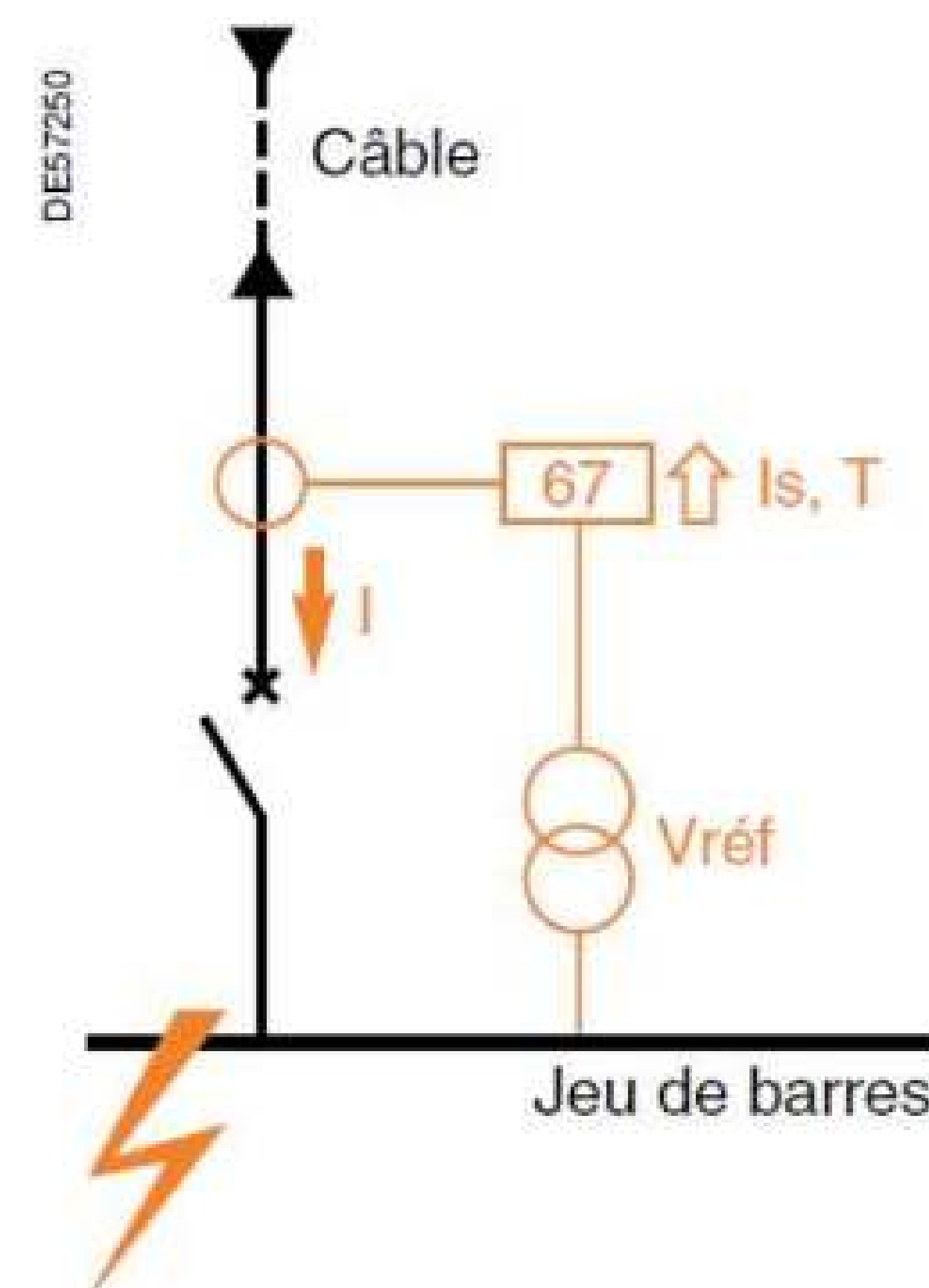
Ce principe est souvent utilisé pour protéger des réseaux MT comportant des antennes avec de nombreux étages de sélectivité.

II.6. Mode de sélectivité

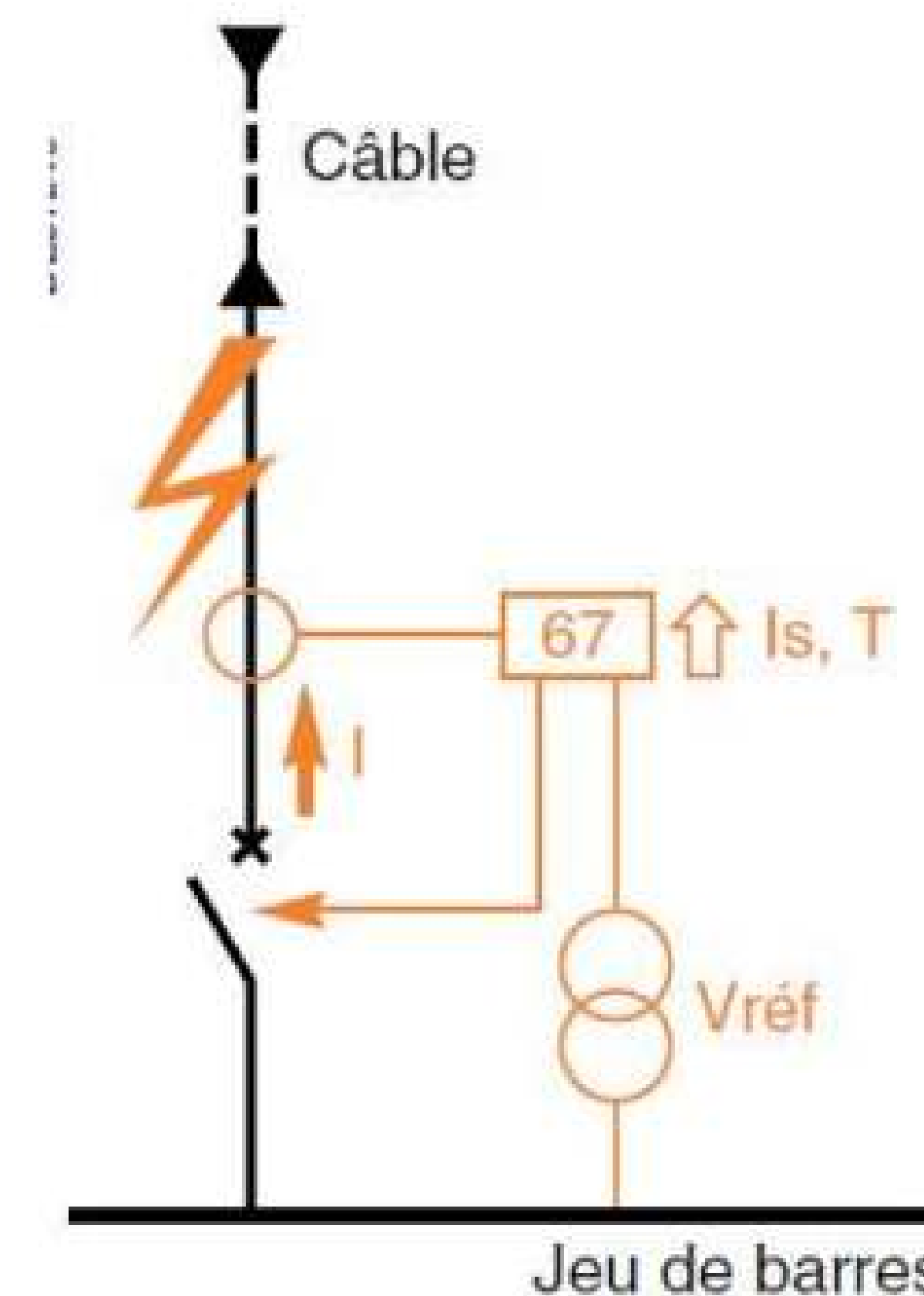
II.6.5. Sélectivité par protection directionnelle

Principe

Dans un réseau bouclé, où un défaut est alimenté par les deux extrémités, il faut utiliser une protection sensible au sens d'écoulement du courant de défaut pour pouvoir le localiser et l'éliminer de façon sélective, c'est le rôle des protections directionnelles à maximum de courant.



Principe de la protection directionnelle
Fig. 2 : protection non active



Principe de la protection directionnelle
Fig. 1 : protection active

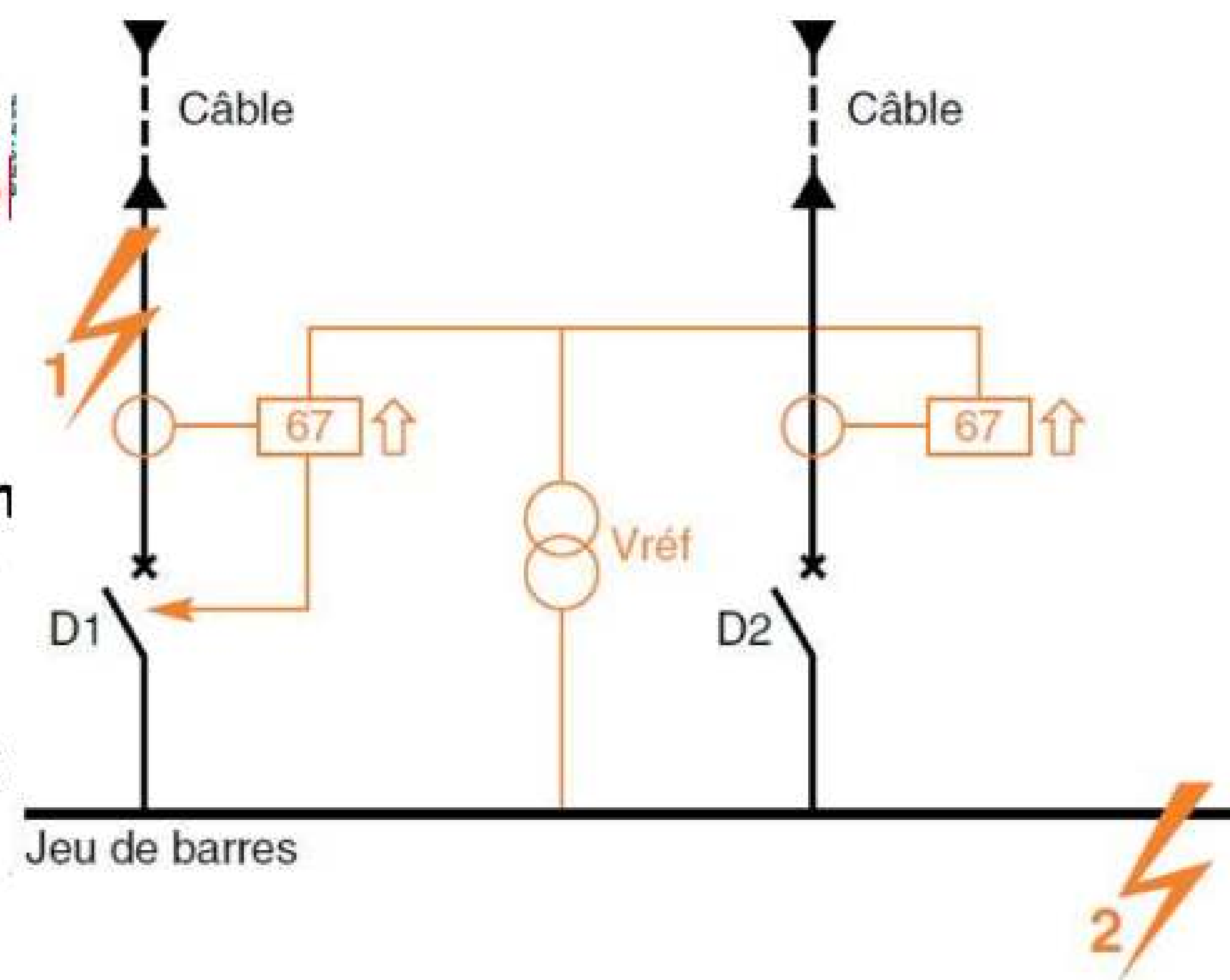
II.6. Mode de sélectivité

II.6.5. Sélectivité par protection directionnelle

Mode de fonctionnement

Les actions de la protection seront différentes selon le sens c'est-à-dire suivant le déphasage du courant par rapport à une donnée par le vecteur de tension ; le relais doit donc disposer d'informations de courant et de tension.

Les conditions de fonctionnement, à savoir le positionnement de déclenchement et de non déclenchement sont à adapter pour protéger (fig. 3).



Protection directionnelle

Fig. 4 : exemple de deux arrivées en parallèle

Exemple d'utilisation de protections directionnelles (fig. 4) :

D1 et D2 sont équipés de protections directionnelles activées si le courant s'écoule du jeu de barres vers le câble.

En cas de défaut au point 1, seule la protection de D1 voit le défaut. La protection sur D2 ne le voit pas, en raison de son sens de détection. Le disjoncteur D1 s'ouvre.

En cas de défaut au point 2, ces protections ne voient rien, et les disjoncteurs D1 et D2 restent fermés.

D'autres protections sont à prévoir pour protéger le jeu de barres.

II.6. Mode de sélectivité

II.6.5. Sélectivité par protection directionnelle

Avantage

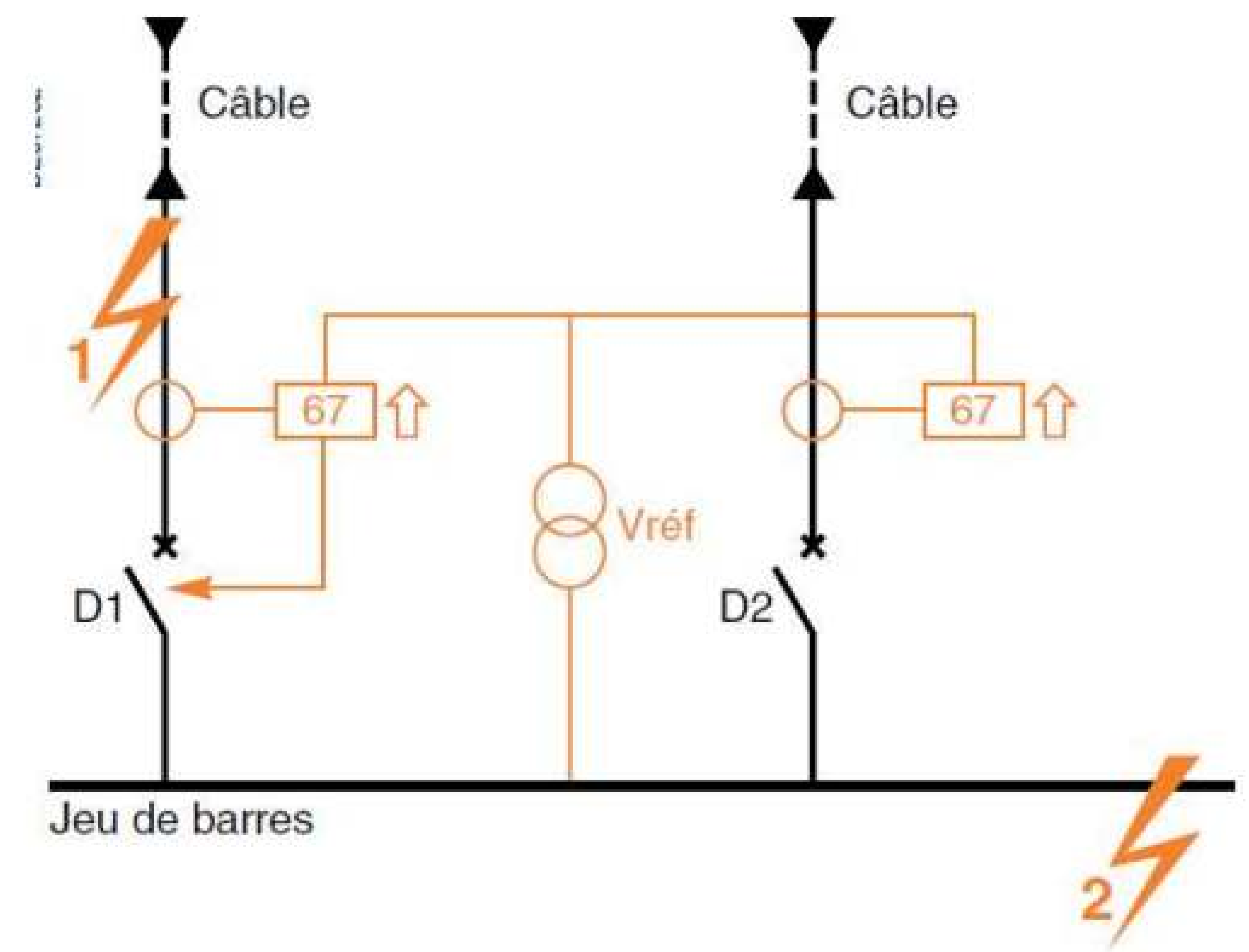
La solution employée est simple et utilisable dans de nombreux cas.

Inconvénient

Le dispositif nécessite l'utilisation de transformateurs de tension qui serviront de référence de phase pour la détermination du sens du courant..

Application

Ce principe est utilisé pour protéger des arrivées en parallèle, des réseaux en boucle fermée, ou certains cas de protection contre les défauts à la terre.



Protection directionnelle

Fig. 4 : exemple de deux arrivées en parallèle

II.6. Mode de sélectivité

II.6.6. Sélectivité par protection différentielle

Principe

Ces protections comparent les courants aux deux extrémités du tronçon de réseau surveillé.

Mode de fonctionnement

Toute différence d'amplitude et de phase entre ces courants signale la présence d'un défaut : la protection ne réagit qu'aux défauts internes à la zone couverte et est insensible à tout défaut externe. Elle est donc sélective par nature.

Le fonctionnement est possible à condition d'utiliser des transformateurs de courant spécifiquement dimensionnés, rendant insensible la protection aux autres phénomènes.

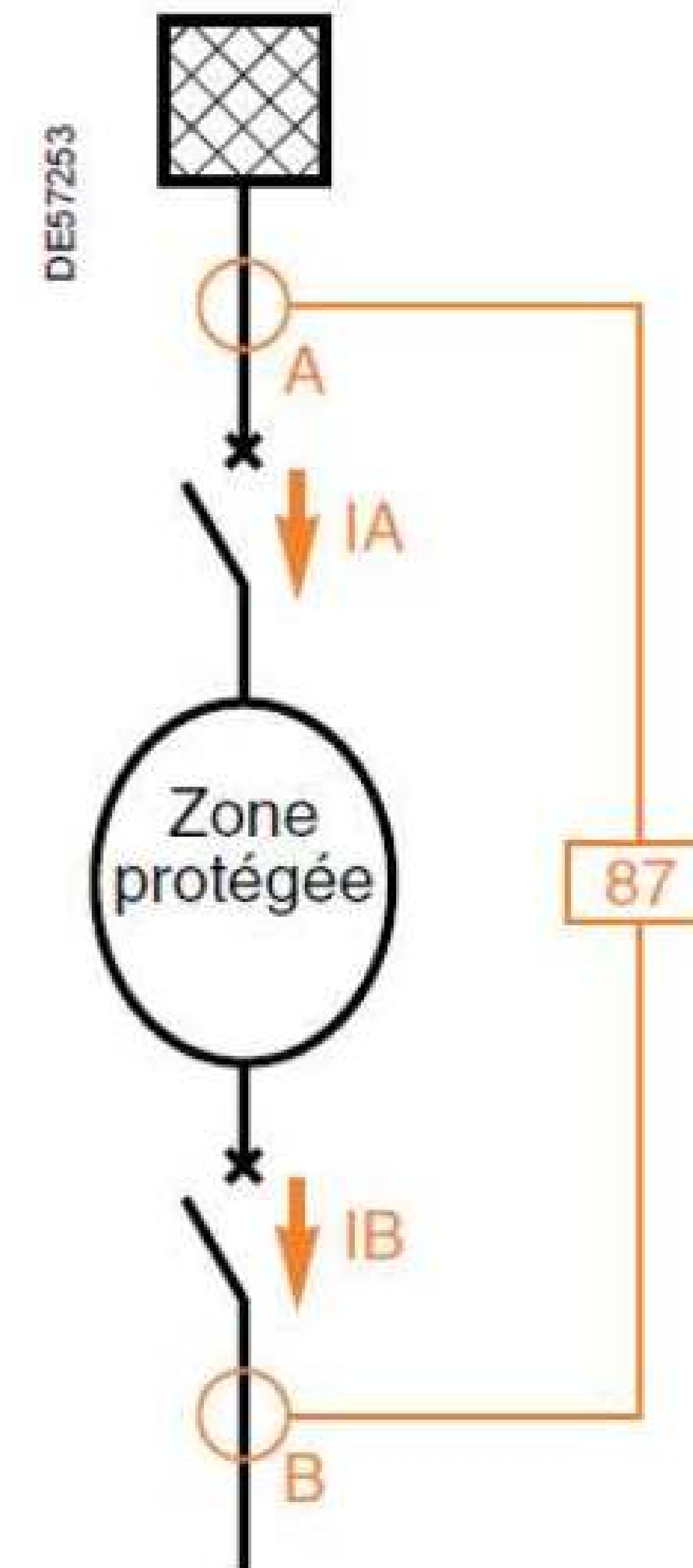


Fig. 1 : principe de la protection différentielle

II.6. Mode de sélectivité

II.6.7. Sélectivités combinées

Une sélectivité mixte est une combinaison de fonctions élémentaires de sélectivité procurant des avantages complémentaires aux sélectivités simples :

- **sélectivité totale,**
- **redondance ou secours.**

Plusieurs exemples pratiques d'application par association de sélectivités sont explicités :

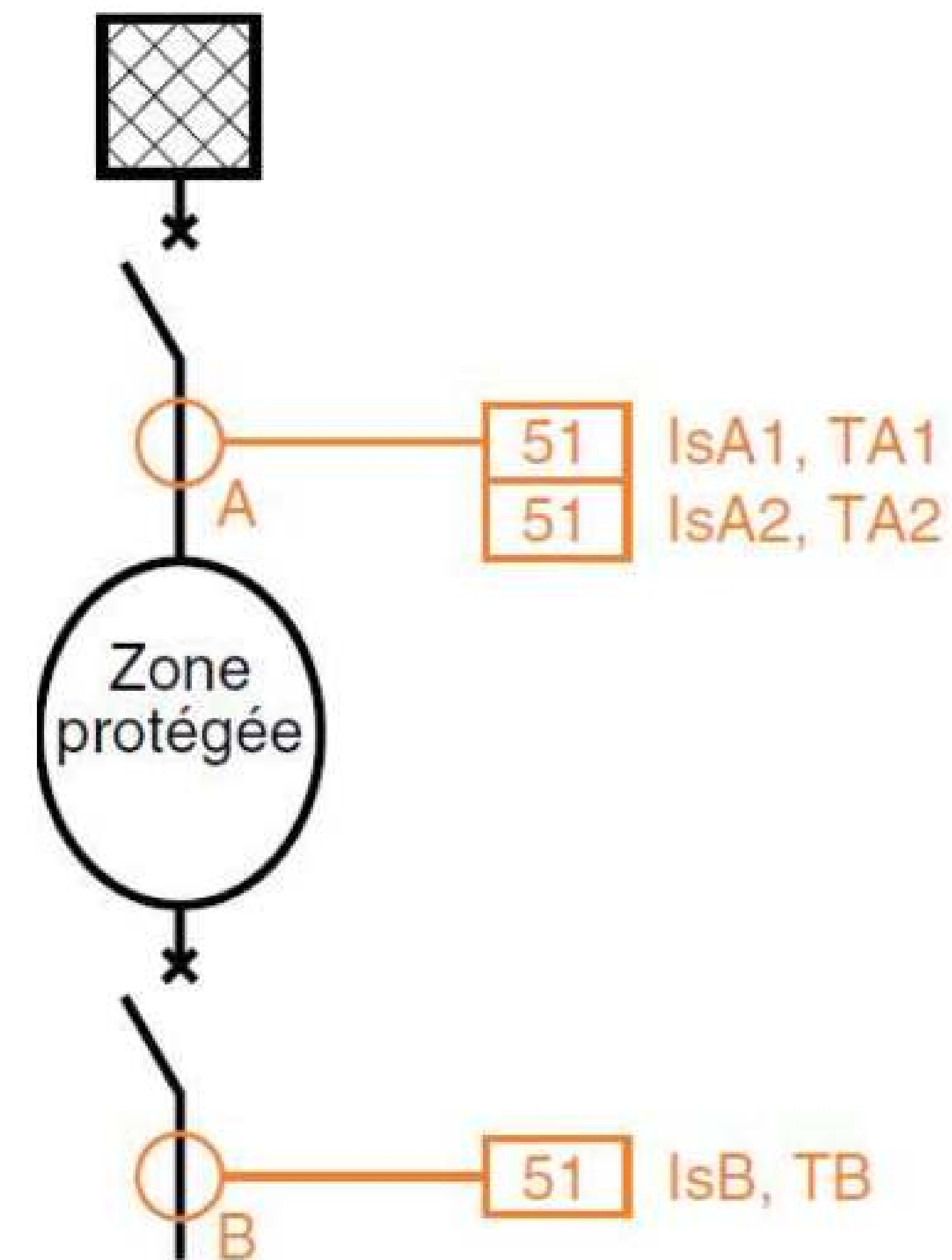
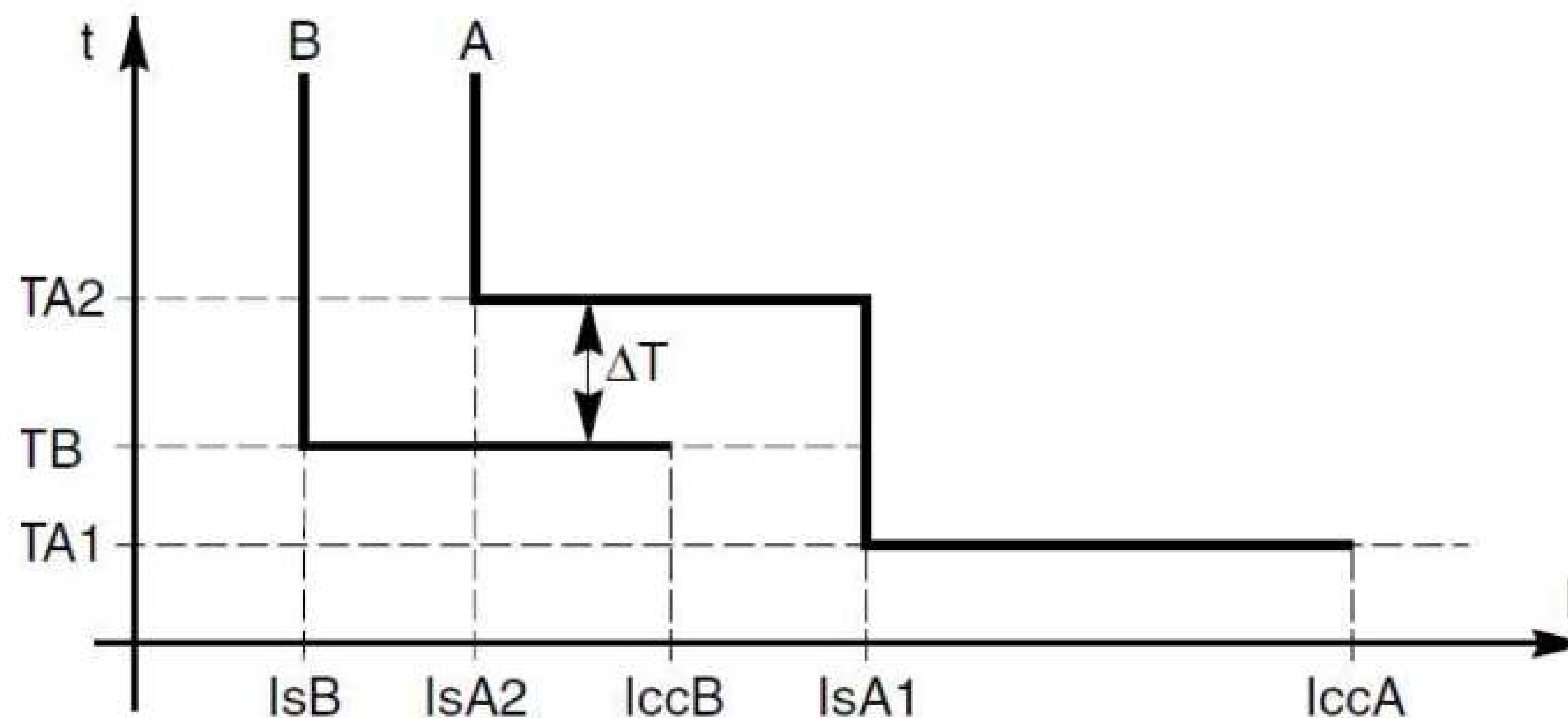
- **ampèremétrique + chronométrique,**
- **logique + chronométrique,**
- **chronométrique + directionnelle,**
- **logique + directionnelle,**
- **différentielle + chronométrique.**

a) Sélectivités ampèremétrique + chronométrique

L'exemple montre que l'on définit à la fois :

- une sélectivité ampèremétrique entre A1 et B,
- une sélectivité chronométrique entre A2 et B.

On obtient alors une sélectivité totale, et la protection en A assure le secours de la protection B.

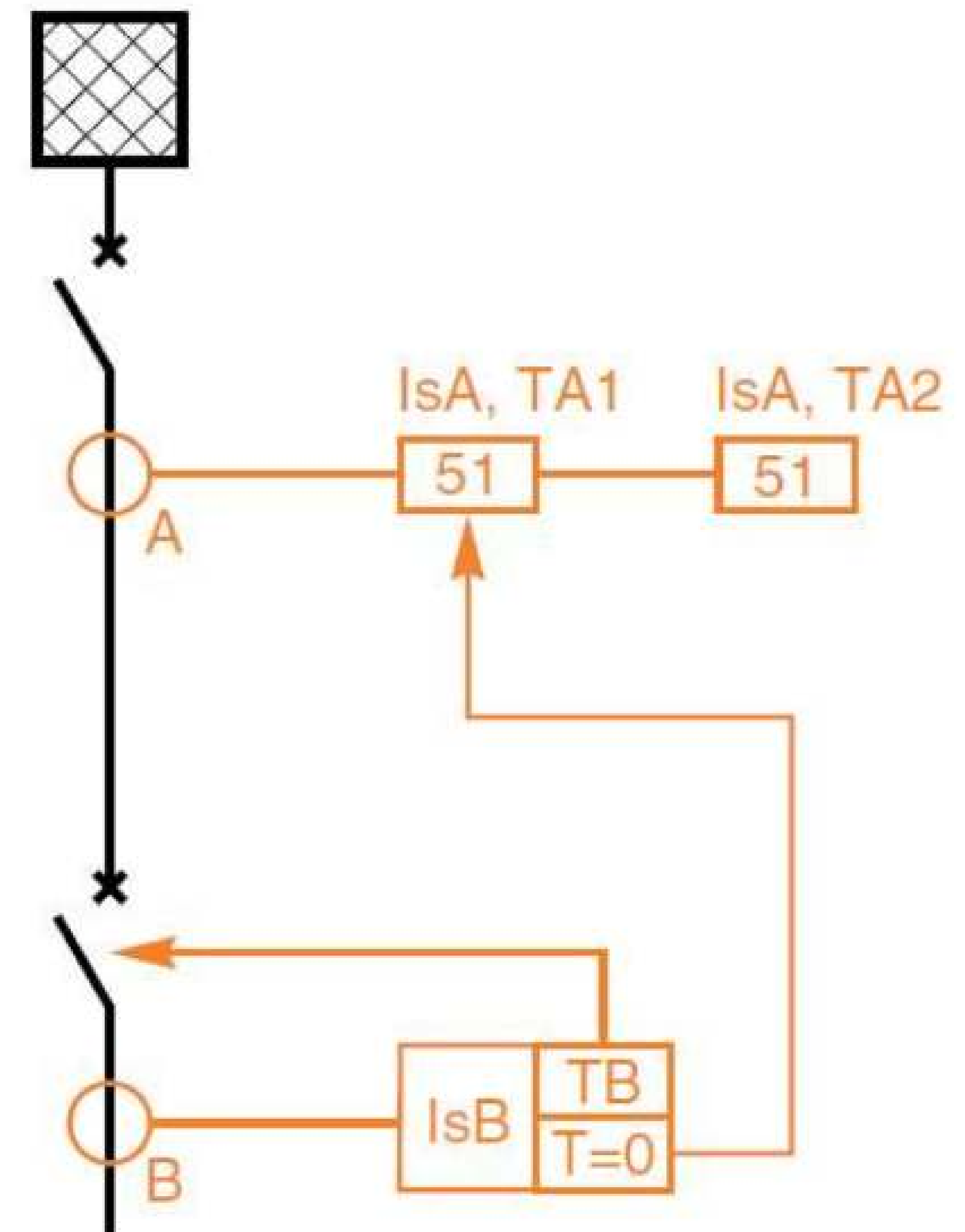
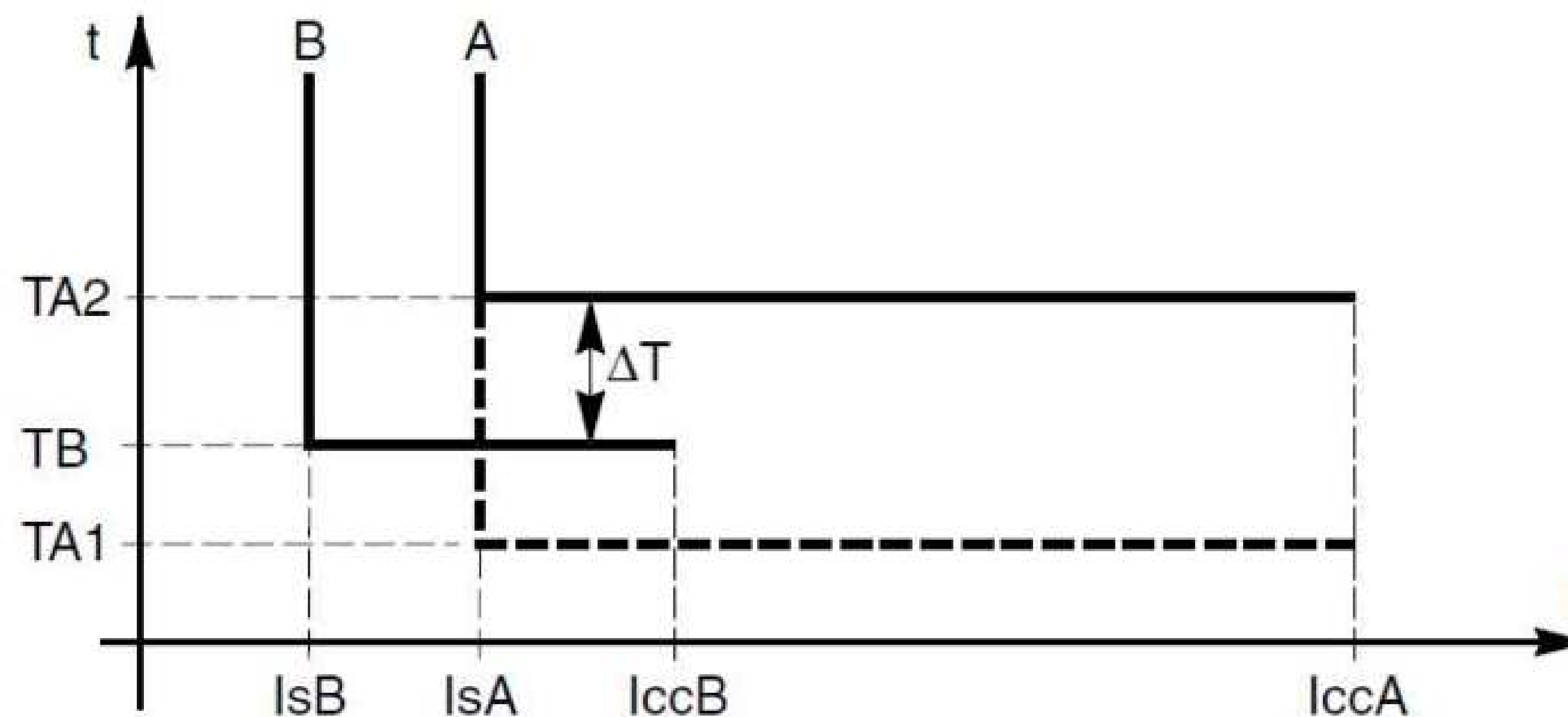


b) Sélectivités logique + secours chronométrique

L'exemple montre que l'on définit à la fois :

- une sélectivité logique entre A1 et B,
- une sélectivité chronométrique entre A2 et B.

La protection A2 assure alors un secours de la protection A1, si celle-ci est défaillante du fait d'un défaut d'attente logique (ordre d'attente permanent).



c) Sélectivité mixte, logique + chronométrique

L'exemple montre que l'on définit à la fois :

- une sélectivité logique à l'intérieur d'un tableau (A et B d'une part, C et D d'autre part),
- une sélectivité chronométrique entre les deux tableaux B et D, avec $T_B = T_D + \Delta T$.

Il n'est pas nécessaire d'installer une liaison de transmission de signaux logiques entre deux tableaux éloignés. Les temporisations des déclenchements sont réduites par comparaison à une simple sélectivité chronométrique.

- de plus, il faut prévoir un secours chronométrique en A et C.

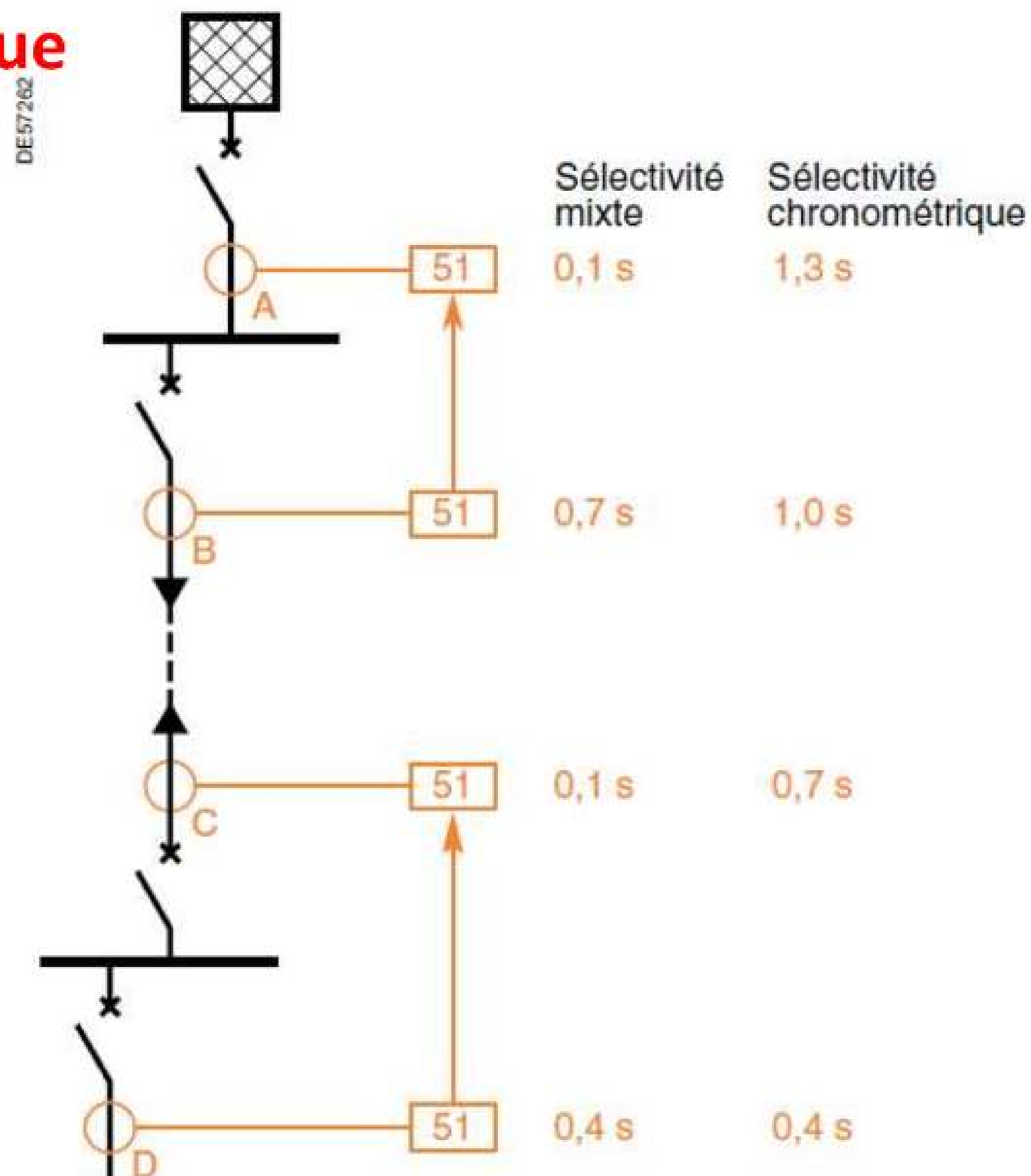


Fig. 3 : comparaison des temps de déclenchement entre sélectivité mixte et sélectivité chronométrique

d) Sélectivités chronométrique + directionnelle

D1 et D2 sont équipés de protections directionnelles faiblement temporisées,
H1 et H2 sont équipés de protections à maximum de courant temporisées.

En cas de défaut au point 1, seules les protections de D1 (directionnelle), H1 et H2 voient le défaut. La protection sur D2 ne le voit pas, en raison de son sens de détection. D1 s'ouvre. La protection de H2 se désexcite, H1 s'ouvre et ainsi le tronçon en défaut H1-D1 est isolé.

$$TH1 = TH2$$

$$TD1 = TD2$$

$$TH = TD + \Delta T$$

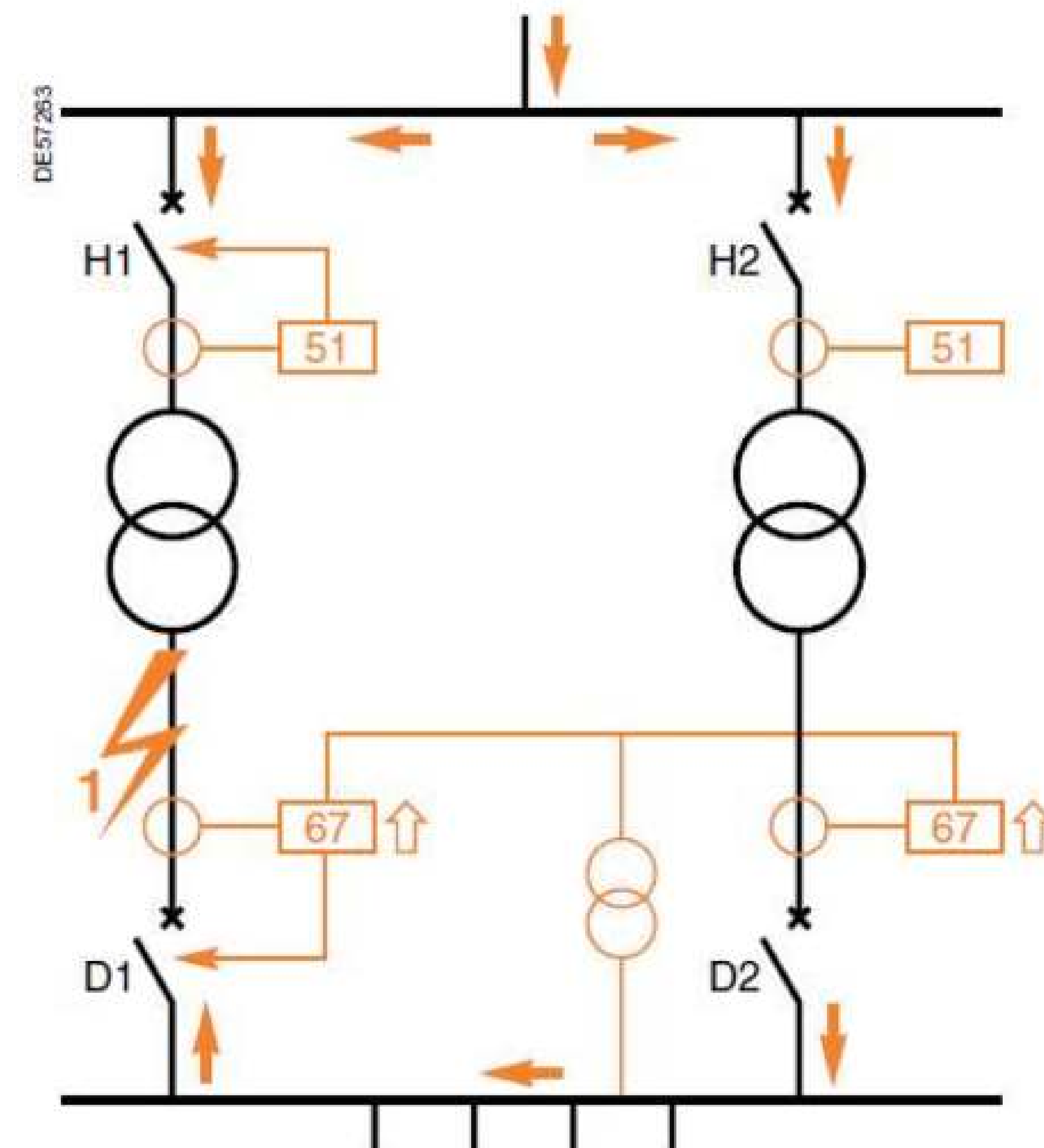


Fig. 1 : sélectivités chronométrique + directionnelle

e) Sélectivités logique + directionnelle

L'exemple montre que l'orientation des ordres d'attente logique est dépendante du sens d'écoulement du courant.

Ce principe est utilisé pour le couplage de deux jeux de barres et pour les boucles fermées.

Défaut côté D2 :

- ouverture en D2 et B,
- D1 est bloqué par B (AL : attente logique).

Défaut côté D1:

- ouverture en D1 et B,
- D2 est bloqué par B (AL : attente logique).

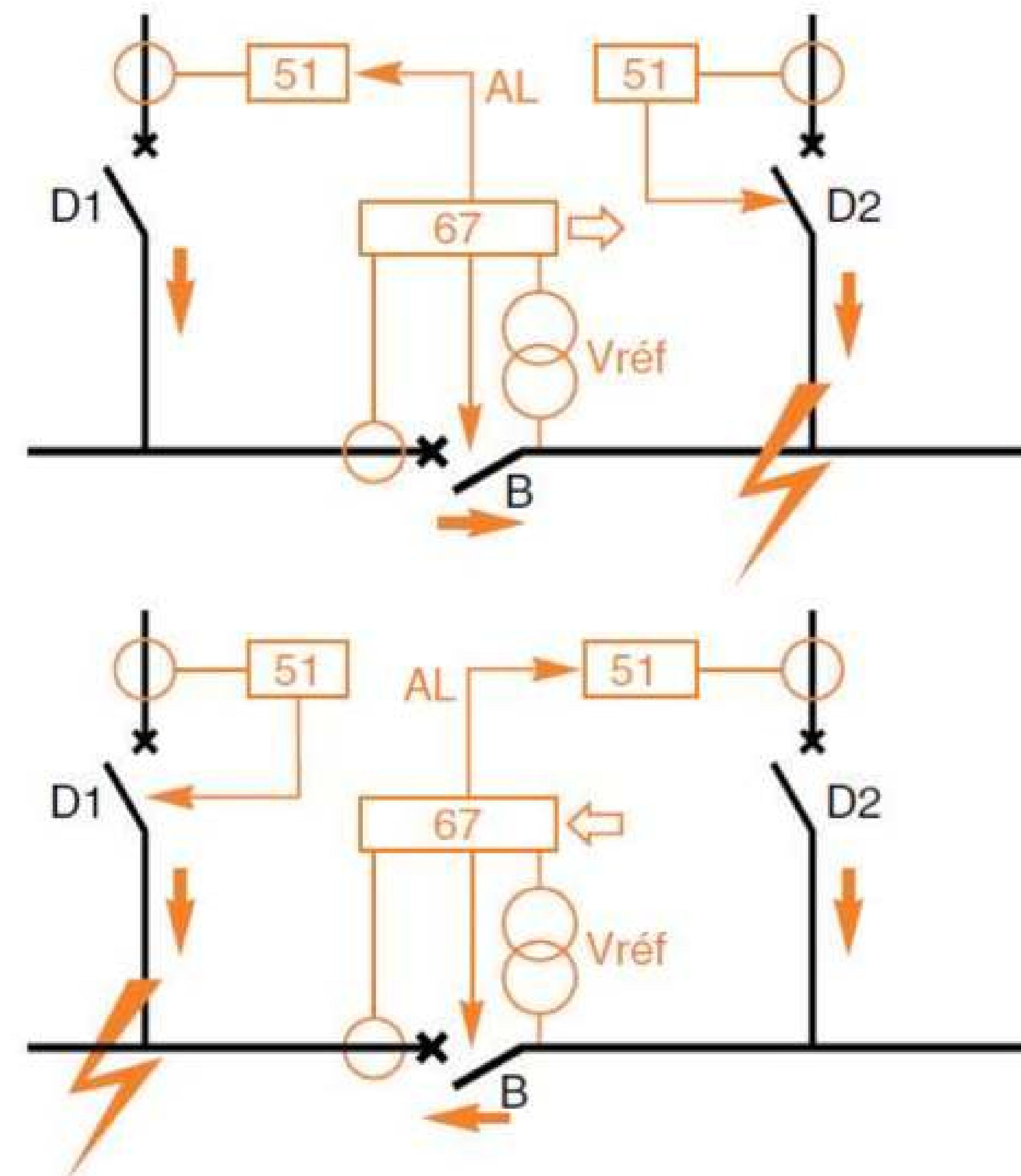


Fig. 2 : sélectivités logique + directionnelle

f) Sélectivités différentielle + chronométrique

L'exemple montre que l'on définit à la fois :

- une protection différentielle instantanée,
- une protection de courant de phase ou de terre en A en secours de la protection différentielle,
- une protection de courant en B pour protéger la zone située en aval,
- une sélectivité chronométrique entre les protections en A et B, avec $T_A = T_B + \Delta T$.

De la sorte, on assure un secours de la protection différentielle, mais des transformateurs de courant à deux enroulements sont parfois nécessaires.

Remarque : la sélectivité chronométrique peut être remplacée par la sélectivité logique.

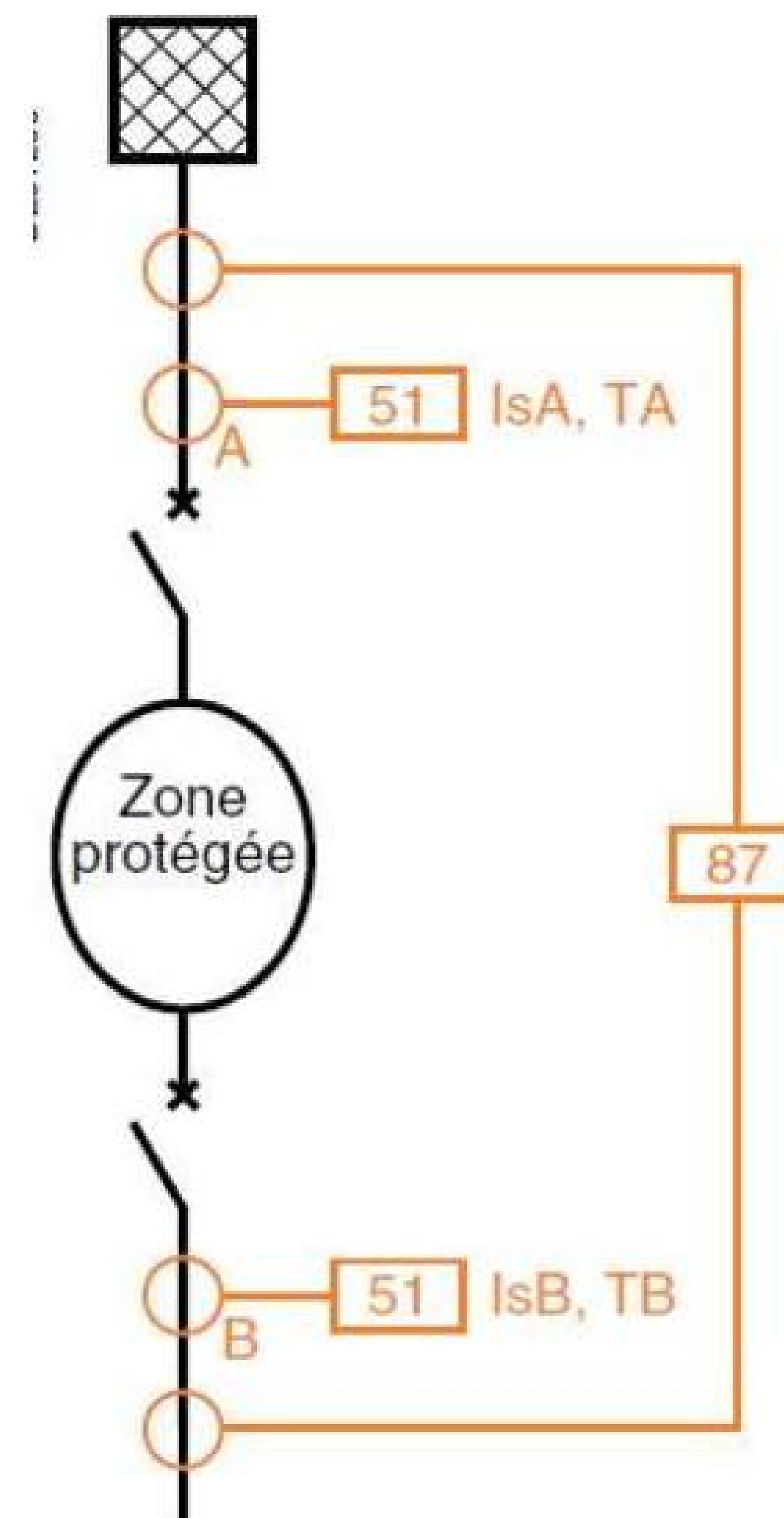


Fig. 3 : sélectivités différentielle + chronométrique