CHAPITRE V
Calcul d'une installation électrique BT

V.1 Introduction

L'étude de l'installation consiste à déterminer précisément les canalisations et leurs protections électriques en commençant à l'origine de l'installation pour aboutir aux circuits terminaux. Chaque ensemble constitué par la canalisation et sa protection doit répondre simultanément à plusieurs conditions qui assurent la sûreté de l'installation :

- Véhiculer le courant d'emploi permanent et ses pointes transitoires normales
- Ne pas générer de chutes de tension susceptibles de nuire au fonctionnement de certains récepteurs, comme par exemple les moteurs en période de démarrage, et amenant des pertes en ligne onéreuses. En outre le disjoncteur (ou fusible) doit :
    - Protéger la canalisation pour toutes les surintensités jusqu'au courant de court-circuit
    - Assurer la protection des personnes contre les contacts indirects dans le cas où la distribution s'appuie sur le principe de protection du schéma de liaison à la terre IT ou TN.

L'étude d'une installation électrique se fait méthodiquement en respectant les étapes suivantes :

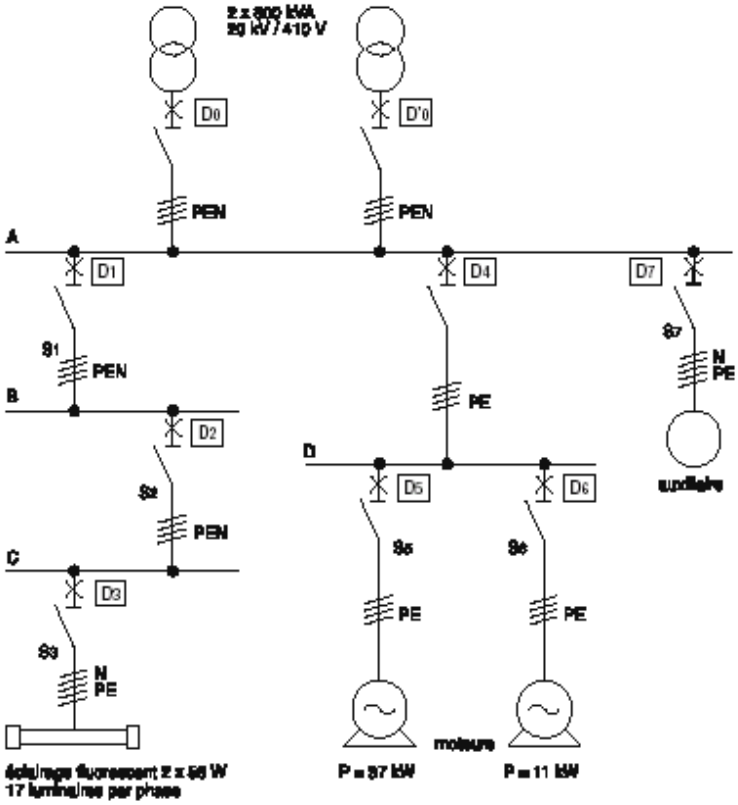
- **1. détermination des calibres In des déclencheurs des disjoncteurs**
- **2. détermination des sections de câbles**
- **3. détermination de la chute de tension**
- **4. détermination des courants de court-circuit**
- **5. choix des dispositifs de protection**
- **6. sélectivité des protections**
- **7. mise en œuvre de la technique de filiation**
- **8. optimisation de la sélectivité des protections**
- **9. sélectivité renforcée par coordination**
- **10. vérification de la protection des personnes**

Exemple

Pour illustrer cette démarche d'étude, on se propose d'étudier l'installation suivante en régime de neutre TN. Entre chaque transformateur et le disjoncteur de source correspondant, il y a 5 m de câbles unipolaires et entre un disjoncteur de source et un disjoncteur de départ, il y a 1 m de barres en cuivre. Tous les câbles sont en cuivre et la température ambiante est de 35 °C.

Caractéristiques des câbles

longueur (m)	repère câble	I_B (A)	mode de pose
41	S_1	350	câble unipolaire PR sur chemin de câbles avec 4 autres circuits
14	S_2	110	câble multipolaire PR sur chemin de câbles avec 2 autres circuits
80	S_3	16	câble multipolaire PVC en goulotte avec 2 autres circuits
28	S_4	230	câble multipolaire PR sur tablette avec 2 autres circuits
50	S_5	72	câble multipolaire PR fixé aux parois
75	S_6	23	câble multipolaire PR seul en conduit
10	S_7	17	câble multipolaire PR seul en conduit



V-1 Détermination des calibres In des déclencheurs des disjoncteurs

Les tableaux des **pages K36 et K37** déterminent directement les calibres des disjoncteurs terminaux en fonction de la puissance et de la nature du récepteur.

Pour les autres départs, il suffit de vérifier la relation In **u** IB et prendre le calibre existant dans les tableaux de choix des disjoncteurs, **pages K52 à K73**. Il sera nécessaire de vérifier le déclassement en température des calibres choisis à l'aide des tableaux des **pages K347 à K352**.

repère disjoncteur	puissance	courant d'emploi (A)	calibre
D0 et D'0	800 kVA	1 126	1 250
D1		350	400
D2		110	125
D3	17 luminaires/ph 2 x 58 W	16	16
D4		230	250
D5	37 kW	72	80
D6	11 kW	23	25
D7		17	20

V-2 Détermination des sections de câbles

La section des conducteurs doit être déterminée en fonction :

a) de leur température maximale admissible ;

b) de la chute de tension admissible ;

c) des différentes contraintes électromécaniques mécaniques susceptibles de se produire

NOTE – Les points énumérés ci-dessus concernent, en premier lieu, la sécurité des installations électriques. Des valeurs de section plus grandes que celles qui sont exigées par la sécurité peuvent être souhaitables pour une exploitation économique.
Les conditions de détermination des sections des conducteurs sont données dans les articles suivants :

- 523 pour les courants admissibles en fonction de la température maximale admissible
- 533 pour les contraintes en cas de court-circuit ;
- 532 et 543 pour les contraintes dues aux courants de défaut ;
- 525 pour la chute de tension.

L'application pratique de ces conditions est donnée dans les guides UTE C 15-105 pour les conducteurs et câbles isolés et UTE C 15-107 pour les circuits comportant des canalisations préfabriquées

Pour obtenir la section des conducteurs de phase, il faut :

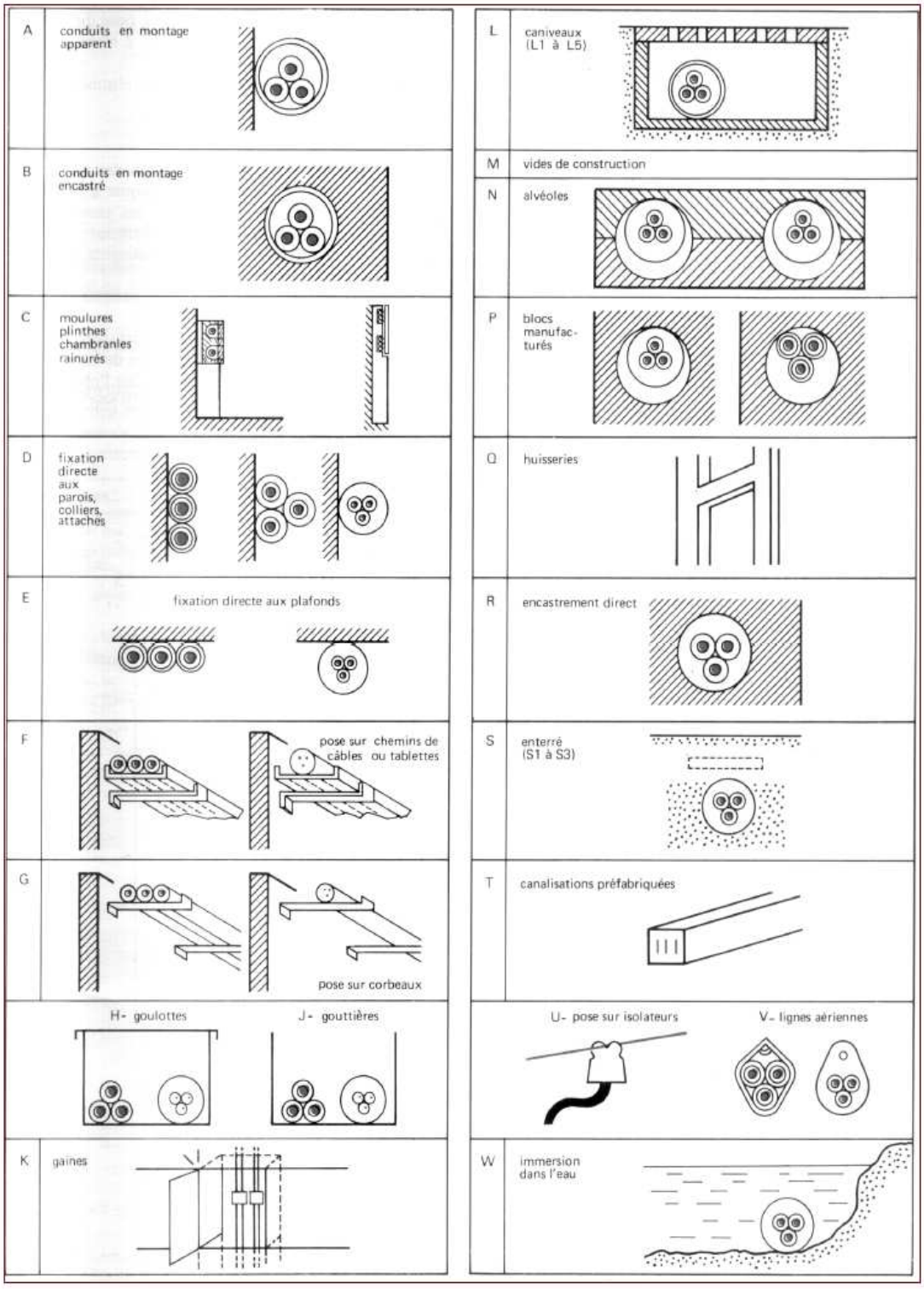
- **Déterminer une lettre de sélection** qui dépend du conducteur utilisé et de **son mode de pose**
- **Déterminer un coefficient K** (voir Tableau K38) qui caractérise l'influence des différentes conditions d'installation.
- **Déterminer le courant admissible I_Z** supporté par la canalisation

V-2.1 Méthodes de référence ou Lettre de sélection

Il existe plusieurs lettres de sélection dont les quatre lettres de sélection B,C,,E et F qui définissent les différents ensembles de mode de pose des canalisations (voir tableau ci dessous:

Type d'éléments conducteurs	**Mode de pose**	**Lettre de selection**
Conducteurs Câbles multiconducteurs	- Sous conduit, profilé ou goulotte, en apparents ou encastré -Sous vide de construction, faux plafond - Sous caniveaux, moulures plinthes, chambranles	**B**
Conducteurs Câbles multiconducteurs	- En apparent contre mur ou plafond - Sur chemin de câbles ou tablette non perforée	**C**
Câbles multiconducteurs	- Sur échelles, corbeaux, chemins de câbles perforés - Fixés en apparent, espacés de la paroi - Câbles suspendus	**E**
Câbles monoconducteurs	- Sur échelles, corbeaux, chemins de câbles perforés - Fixés en apparent, espacés de la paroi - Câbles suspendus	**F**

Les différents modes de pose des canalisations



V.2.2 Détermination du coefficient de correction :K

Ce coefficient **K** s'obtient en multipliant les facteurs de correction**, K1, K2, K3, Kn et Ks**

K= K1.K2.K3.Kn.Ks

Le facteur de correction K1

Prend en compte le mode de pose des circuits

lettre de sélection	cas d'installation	K1
B	■ câbles dans des produits encastrés directement dans des matériaux thermiquement isolants	0,70
	■ conduits encastrés dans des matériaux thermiquement isolants	0,77
	■ câbles multiconducteurs	0,90
	■ vides de construction et caniveaux	0,95
C	■ pose sous plafond	0,95
B, C, E, F	■ autres cas	1

Le facteur de correction K2

Prend en compte l'influence mutuelle des circuits placés côte à côte. Une pose est jointive lorsque la distance entre 2 conducteurs est inférieure au double du diamètre d'un conducteur. Lorsque les câbles sont disposés en plusieurs couches, appliquer en plus le facteur de correction suivant

- (facteur multiplicatif de K2) : 2 couches (0,8), 3 couches (0,73), 4 ou 5 couches (0,7).

lettre de sélection	disposition des câbles jointifs	facteur de correction K2									
		nombre de circuits ou de câbles multiconducteurs									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	12
B, C	encastrés ou noyés dans les parois	1,00	0,80	0,70	0,65	0,60	0,57	0,54	0,52	0,50	0,45
C	simple couche sur les murs ou les planchers ou tablettes non perforées	1,00	0,85	0,79	0,75	0,73	0,72	0,72	0,71	0,70	0,70
	simple couche au plafond	0,95	0,81	0,72	0,68	0,66	0,64	0,63	0,62	0,61	0,61
E, F	simple couche sur des tablettes horizontales perforées ou tablettes verticales sur des tablettes	1,00	0,88	0,82	0,77	0,75	0,73	0,73	0,72	0,72	0,72
	simple couche sur des échelles à câbles, corbeaux, etc.	1,00	0,87	0,82	0,80	0,80	0,79	0,79	0,78	0,78	0,78

Le facteur de correction K3

Prend en compte la température ambiante et la nature de l'isolant

températures ambiantes (°C)	isolation		
	élastomère (caoutchouc)	polychlorure de vinyle (PVC)	polyéthylène réticulé (PR) butyle, éthylène, propylène (EPR
10	1,29	1,22	1,15
15	1,22	1,17	1,12
20	1,15	1,12	1,08
25	1,07	1,07	1,04
30	1,00	1,00	1,00
35	0,93	0,93	0,96
40	0,82	0,87	0,91
45	0,71	0,79	0,87
50	0,58	0,71	0,82
55	–	0,61	0,76

Le facteur de correction du neutre chargé Kn.(selon la norme) Kn = 0,84

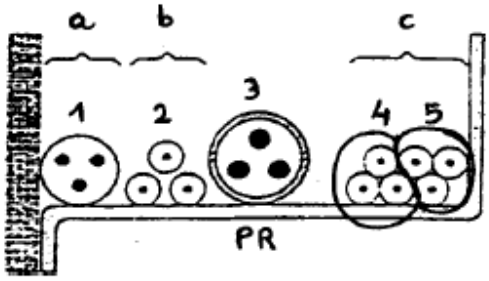
Le facteur de correction dit de symétrie Ks (selon la norme NF C15-105 § B.5.2)

Ks = 1 pour 2 et 4 câbles par phase avec le respect de la symétrie

Ks = 0,8 pour 2, 3 et 4 câbles par phase si non respect de la symétrie

Exemple :
Un câble PR triphasé est installé sur un chemin de câbles perforé, jointivement avec 3 autres circuits constitués :
- d'un câble triphasé (1er circuit) - a
- de 3 câbles unipolaires (2ème circuit) - b
- de 6 câbles unipolaires (3ème circuit). Ce circuit est constitué de 2 conducteurs par phase - c

Il y a donc 4 groupements triphasés (1 à 5 sur la figure), la température ambiante est considérée égale à 40°C.
Les tableaux précédents indiquent : lettre de sélection E, K1 = 1, K2 = 0,77, K3 = 0,91, donc K = 0,68



V.2.3 Détermination du courant assigné de la canalisation
Connaissant le courant I_B qui traverse dans des conditions normales d'exploitation et le coefficient de correction K de la canalisation, alors : on a :

$$I_Z = I_B/K.$$

V.2.4 Détermination de la section des conducteurs de phases
La section des conducteurs est déterminée a partir des tableaux **K38,K39** ou les tableaux **52G** et **52H.**
RM : Ces tableaux sont utilisables que pour des canalisations non enterrées et protégées par disjoncteur. Pour les câbles enterrés utiliser les tableaux des **pages K40 et K41**
V.1.5 Application pour l'exemple

repère câble	calibre (A)	coefficient K	lettre	section (mm²)
S1	400	0,72	F	240
S2	125	0,76	C	50
S3	16	0,59	B	4
S4	250	0,76	C	150
S5	80	0,96	E	16
S6	25	0,86	B	4
S7	20	0,86	B	2,5

V-3 Détermination de la chute de tension
L'impédance d'un câble est faible mais non nulle : lorsqu'il est traversé par le courant de service, il y a chute de tension entre son origine et son extrémité.
Or le bon fonctionnement d'un récepteur (surtout un moteur) est conditionné par la valeur de la tension à ses bornes. Il est donc nécessaire de limiter les chutes de tension en ligne par un dimensionnement correct des câbles d'alimentation.
Ces pages vous aident à déterminer les chutes de tension en ligne, afin de vérifier :
- La conformité aux normes et règlements en vigueur
- La tension d'alimentation vue par le récepteur

- L’adaptation aux impératifs d’exploitation

V 3 1 **Les normes limitent les chutes de tension en ligne et puissances**

La norme NF C 15-100 impose que la chute de tension entre l’origine de l’installation BT et tout point d’utilisation n’excède pas les valeurs du tableau ci-contre.

D’autre part la norme NF C 15-100 § 552-2 limite la puissance totale des moteurs installés chez l’abonné BT tarif bleu. Pour des puissances supérieures aux valeurs indiquées ci-dessous, l’accord du distributeur d’énergie est nécessaire

V 3 1a Chute de tension maximale entre l’origine de l’installation BT et l’utilisation

Abonné alimenté par le réseau BT de distribution publique

Eclairage **3 %,**

Autres usages(force motrice) **5 %**

Abonné propriétaire de son poste HT-A/BT

Eclairage **6%,**

Autres usages(force motrice) **8 %**

- **Nota :**cette valeur de 8 % risque cependant d’être trop élevée pour 3 raisons :
  - **1/** le bon fonctionnement des moteurs est en général garanti pour leur tension nominale±5 % (en régime permanent)
  - **2/** le courant de démarrage d’un moteur peut atteindre ou même dépasser 5 à 7 In. Si la chute de tension est de 8 % en régime permanent, elle atteindra probablement au démarrage une valeur très élevée (15 à 30 % dans certains cas). Outre le fait qu’elle occasionnera une gêne pour les autres usagers, elle risque également d’être la cause d’un non-démarrage du moteur
  - **3/** enfin chute de tension est synonyme de pertes en lignes, ce qui va à l’encontre des économies d’énergie. Pour ces raisons il est recommandé de ne pas atteindre la chute de tension maximale autorisée.

V 3 1b Puissance maxi de moteurs installés chez un abonné BT

(I < 60 A en triphasé ou 45 A en monophasé)

- moteurs monophasés (230 V)

- Locaux d’habitation 1,4 kW
- Autres réseau aérien 3 kW
-Locaux réseau souterrain 5,5 kW

- moteurs triphasés (400 V) monophasés (230 V)

A démarrage direct

- Locaux d’habitation 5,5 kW
- Autres réseau aérien 11 kW
-Locaux réseau souterrain 22 kW

Autres modes pleine puissance de démarrage

- Locaux d’habitation 11 kW
- Autres réseau aérien 22 kW
-Locaux réseau souterrain 45 kW

V.3 2 détermination de la chute de tension (fiche K44,K45 1c)

Les chutes de tension sont déterminées à l'aide de la formule :

$$u = b(\rho L S^{-1} \cos\varphi + \lambda L \sin\varphi) I_B$$

u étant la chute de tension, en volts,
b étant un coefficient égal à 1 pour les circuits triphasés, et égal à 2 pour les circuits monophasés.
NOTE - Les circuits triphasés avec neutre complètement déséquilibrés (une seule phase chargée) sont considérés comme des circuits monophasés.
ρ étant la résistivité des conducteurs en service normal, prise égale à la résistivité à la température en service normal, soit 1,25 fois la résistivité à 20°C, soit **ρ = 0,023 Ωmm²/m pour le cuivre et ρ =0,037 Ωmm²/m pour l'aluminium ;**
L étant la longueur simple de la canalisation, en mètres ;
S étant la section des conducteurs, en mm²;
cosφ étant le facteur de puissance ; en l'absence d'indications précises, le facteur de puissance est pris égal à **0,8** (**sin φ = 0, 6)** ;
λ étant la réactance linéique des conducteurs, prise égale, en l'absence d'autres indications, à **λ =0,08 mΩ/m ;**
$\mathbf{I_B}$ étant le courant d'emploi, en ampères ;
La chute de tension relative (en pour-cent) est égale à :

$$\Delta u\% = 100u/U_0$$

$\mathbf{U_0}$ étant la tension entre phase et neutre, en volts. Voir aussi le guide UTE C 15-105.
La chute de tension en ligne en régime permanent est à prendre en compte pour l'utilisation du récepteur dans des conditions normales (limites fixées par les constructeurs des récepteurs).
La fiche technique **K44** donne les formules usuelles pour le calcul de la chute de tension. Ou plus simplement, des tableaux donnent la chute de tension en % dans 100 m de câble, en 400 V/50 Hz triphasé, en fonction de la section du câble et du courant véhiculé (In du récepteur). Ces valeurs sont données pour un **cos φ** = **0,85** dans le cas d'un moteur et de **cos φ** =**1** pour un récepteur non inductif. Ces tableaux peuvent être utilisés pour des longueurs de câble L ≠ 100 m : il suffit d'appliquer au résultat le coefficient **L/100.**

V.3.3 Calcul des chutes de tension des différents circuits :

1-Le circuit éclairage :

. **U = 0,86 % + 0,31 % + 2,56 % = 3,73 %**

2- Le circuit moteur (37 kW) :

. **U = 0,48 % + 2,05 % = 2,53 %**

3- Le circuit moteur (10 kW) :

. **U = 0,48 % + 3,75 % = 4,23 %**

4- Le circuits auxiliaires :

. **U = 0,63 %.**

V-4 Détermination des courants de court-circuit

V.4 1 introduction

Toute installation électrique doit être protégée contre les courts-circuits et ceci, sauf exception, chaque fois qu'il y a une discontinuité électrique, ce qui correspond le plus généralement à un changement de section des conducteurs. L'intensité du courant de court-circuit est à calculer aux différents étages de l'installation ; ceci pour

pouvoir déterminer les caractéristiques du matériel qui doit supporter ou couper ce courant de défaut.. Pour choisir et régler convenablement les protections, deux valeurs du courant de court-circuit doivent être connues :

- Le courant maximal de court-circuit qui détermine.
- Le pouvoir de coupure (**PdC**)- des disjoncteurs,
- Le pouvoir de fermeture des appareils,
- la tenue électrodynamique des .canalisations et de l'appareillage. Il correspond à un court-circuit à proximité immédiate des bornes aval de l'organe de protection. Il doit être calculé avec une bonne précision (marge de sécurité).
- le courant minimal de court-circuit indispensable au choix de la courbe de déclenchement des disjoncteurs et des fusibles, en particulier quand :
- la longueur des câbles est importante et/ou que la source est relativement impédante (générateurs onduleurs)
- la protection des personnes repose sur le fonctionnement des disjoncteurs ou des fusibles, c'est essentiellement le cas avec les schémas de liaison à la terre du neutre TN ou IT. Pour mémoire, le courant de court-circuit minimal correspond à un défaut de court-circuit à l'extrémité de la liaison protégée lors d'un défaut biphasé et dans les conditions d'exploitation les moins sévères (défaut à l'extrémité d'un feeder et non pas juste derrière la protection, un seul transformateur en service alors que deux sont couplables…). Rappelons que dans tous les cas, quelque soit le courant de court-circuit (du minimal au maximal), la protection doit éliminer le court-circuit dans un temps (tc) compatible avec la contrainte thermique que peut supporter le circuit protégé :

V.4 2 les principaux défauts de court-circuit

Dans les installations électriques différents courts-circuits peuvent se produire.

- Triphasés : 5 % seulement dès l'origine
- Monophasés : 80 % des cas
- Biphasés : 15 % des cas. Ces défauts dégénèrent souvent en défauts triphasés ;

V.4 3 Conséquences des défauts de court-circuit

Elles sont variables selon la nature et la durée des défauts, le point concerné de l'installation et l'intensité du courant :

- Au point de défaut, la présence d'arcs de défaut, avec
  - détérioration des isolants,
  - fusion des conducteurs,
  - incendie et danger pour les personnes ;

V.4 4 Normes et calculs des courants de court-circuit

Plusieurs méthodes sont proposées par les normes.

- Le guide pratique C 15-105, qui complète la NF C 15-100 (Installations BT Alimentées en courant alternatif), présente les quatre méthodes suivantes
  - **Méthode des «impédances»**, qui permet de calculer les courants de défaut en tout point d'une installation avec une bonne précision. Elle consiste à totaliser séparément les différentes résistances et réactances de la boucle de défaut, depuis et y compris la source, jusqu'au point considéré ; puis à calculer l'impédance correspondante. L'Icc est enfin obtenu par l'application de la loi d'Ohm : Toutes les caractéristiques des différents éléments de la boucle de défaut doivent être connues (sources et canalisations)
    - **Icc = Un / Σ (Z).**

- **Méthode«de composition»** utilisable quand les caractéristiques de l'alimentation ne sont pas connues. L'impédance amont du circuit considéré est calculée à partir de l'estimation du courant de court-circuit à son origine. Le facteur de puissance **cos φcc = R / X** est considéré comme identique à l'origine du circuit comme au point du défaut. En d'autres termes cela consiste à admettre que les impédances élémentaires de deux tronçons successifs de l'installation possèdent des arguments suffisamment voisins pour justifier le remplacement des additions vectorielles par des additions algébriques des impédances. Cette approximation permet d'obtenir la valeur du module des courants de court-circuit, avec une précision suffisante pour ajouter un circuit. Cette méthode approchée ne s'applique qu'aux installations de puissance inférieure à 800 kVA.
- **Méthode «conventionnelle»** qui permet sans connaître les impédances ou les Icc de la partie d'installation en amont du circuit considéré, de calculer les courants de court-circuit minimaux et les courants de défaut à l'extrémité d'une canalisation. Elle est basée sur l'hypothèse que la tension à l'origine du circuit est égale à 80 % de la tension nominale de l'installation pendant la durée du court-circuit ou du défaut. Elle ne prend en compte que la résistance des conducteurs à laquelle, pour les fortes sections, elle applique un coefficient majorateur pour tenir compte de leur inductance (1,15 pour 150 mm2, 1,20 pour 185 mm2,…). Cette méthode est essentiellement utilisée pour les circuits terminaux dont l'origine est suffisamment éloignée de la source d'alimentation (réseau ou groupe).

V.4 5 la méthode des impédances : calcul des Icc

a Pour un Court-circuit triphasé C'est le défaut qui correspond à la réunion des trois phases. L'intensité de court-circuit **Icc3** est donnée par :

$$\mathbf{Icc3 = \sqrt{3}U / Zcc}$$

avec U (tension composée entre phases) correspondant à la tension à vide du transformateur, laquelle est supérieure de 3 à 5 % à la tension aux bornes en charge. Par exemple, dans les réseaux 390 V, la tension composée adoptée est U = 410 V, avec comme tension simple U/√ 3 = 237 V. Le calcul de l'intensité de court-circuit se résume alors au calcul de 'impédance Zcc, impédance équivalente à toutes les impédances parcourues par l'Icc du générateur jusqu'au point de défaut (de la source et des lignes - (cf. fig. 12). C'est en fait l'impédance «directe» par phase :

$$\mathbf{Zcc = \sqrt{((\Sigma R)^2 + (\Sigma X)^2)}} \text{ avec}$$

Σ R = somme des résistances en série,

Σ X = somme des réactances en série.

Le défaut triphasé est généralement considéré comme celui provoquant les courants de défaut les plus élevés. En effet, le courant de défaut dans le schéma équivalent d'un système polyphasé, n'est limité que par l'impédance d'une phase sous la tension simple du réseau. Le calcul d'Icc3 est donc indispensable pour choisir les matériels (intensités et contraintes électrodynamiques maximales à supporter).

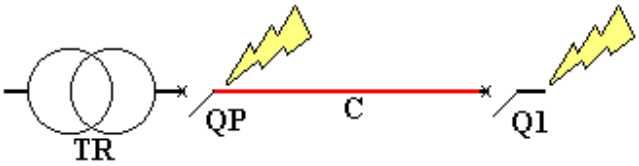
b Pour un court-circuit biphasé isolé Il correspond à un défaut entre deux phases, alimenté sous une tension composée U. L'intensité Icc2 débitée est alors inférieure à celle du défaut triphasé :

$$\mathbf{Icc2 = \sqrt{3}U /2 Zcc}$$

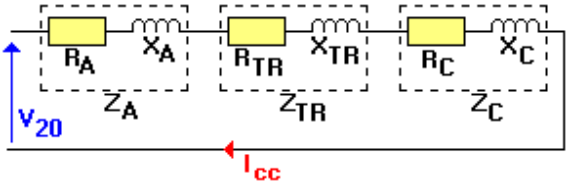
. $$\mathbf{Icc2 = 0{,}86\ Icc3}$$

c Exemple

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.



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.

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

DONNEES

Réseau amont (valeurs ramenées au secondaire du transformateur)

$R_A = 0$, $X_A = 0{,}7$ m Ω

Transformateur

Puissance: S = 400 kVA
Pertes cuivre: P_{CU} = 4600 W
Tension réduite de court-circuit: $U_{CC}(\%)$ = 4%
Tension secondaire à vide: U_{20} = 410V

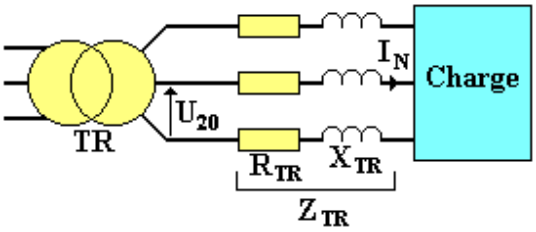
Câble cuivre

Longueur: L = 25 m Section: s = 240 mm^2

Résistivité du cuivre: $\rho = 22{,}5\ m\Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$

Réactance linéique: $0{,}13\ m\ \Omega \cdot m^{-1}$

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.

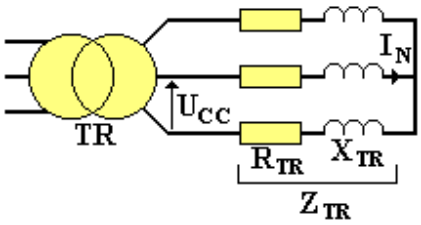
La puissance plaquée sur le transformateur est:

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

Les pertes cuivre sont:

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

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}.



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

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

Câble

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

Réactance $X_C = 0,13 \times 25 = 3,25\,m\Omega$

Court-circuit en aval de QP

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

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

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

Court-circuit en aval de Q1

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

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

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

V.4 6 Méthode suivant la norme Nf C 15 500(voir Fiche K48, K49 1c, K50)

Le tableau de la **page K85** permet d'obtenir la valeur du courant de court-circuit au niveau du jeu de barre principal (point A), en fonction de la puissance et du nombre de transformateurs en parallèle. Le tableau de la **page K50** détermine les valeurs des courants de court-circuit aux différents points où sont installés les dispositifs de protection. Le tableau ci-dessous donne les valeurs des Icc de l'exemple

4 Détermination des courants de court-circuit

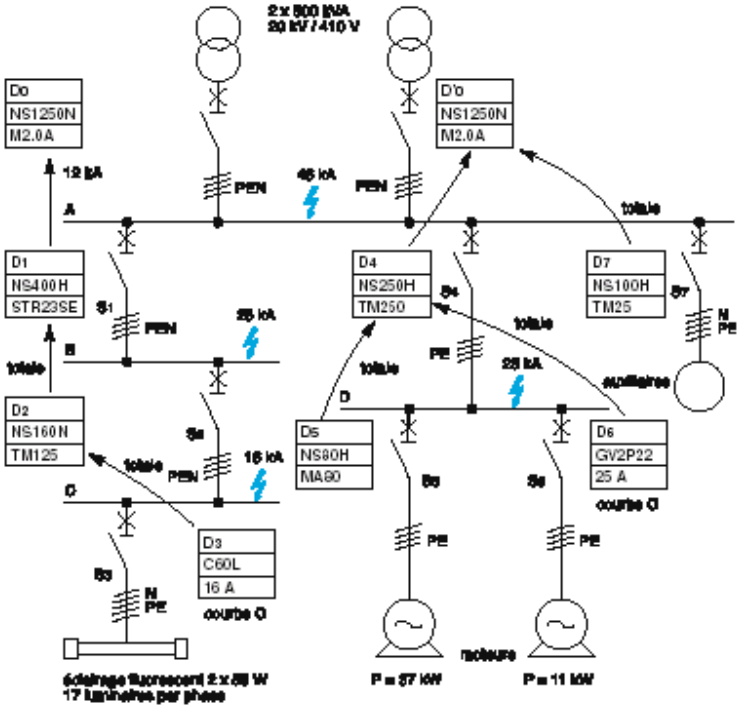
repère tableau	repère câble	section (mm²)	longueur (m)	Icc (kA)
A				48
B	S1	240	41	25
C	S2	50	14	16
D	S4	150	28	25

V-5 Choix des dispositifs de protection

Pour choisir un dispositif de protection, il suffit de vérifier les relations suivantes :

- **1 In ≥ I_B Iz ≥ In**
- **2 PdC ≥ Icc**.

Le choix est obtenu à l'aide des tableaux de choix des disjoncteurs des **pages K52 à K73** et reporté sur le schéma ci-contre.



V-6 Sélectivité des protections

V-6.1 définitions :

La sélectivité entre dispositifs de protection à courant différentiel-résiduel peut être totale ou partielle.

V-6.1 1 Sélectivité totale(535.4.3.1)

Une sélectivité totale entre dispositifs de protection à courant différentiel- résiduel disposés en série peut être prescrite pour des raisons de sécurité ou d'exploitation, de façon à maintenir l'alimentation des parties de l'installation non affectées par le défaut éventuel.

Cette sélectivité peut être obtenue par le choix et la mise en oeuvre des dispositifs de protection à courant différentiel-résiduel qui, tout en assurant la protection requise aux différentes parties de l'installation, interrompent seulement l'alimentation des parties de l'installation en aval du dispositif installé en amont de l'emplacement du défaut et proche de celui-ci.

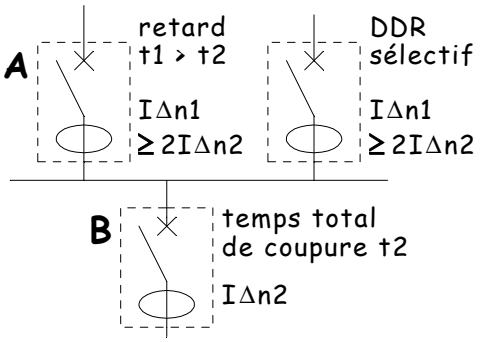
Pour assurer la sélectivité totale de deux dispositifs de protection à courant différentiel-résiduel en série, la caractéristique de non fonctionnement temps/courant du dispositif placé en amont doit se trouver au-dessus de la caractéristique de fonctionnement temps/courant du dispositif placé en aval. Cela se traduit par :

- a) le courant différentiel-résiduel de fonctionnement assigné du dispositif placé en amont doit être supérieur à celui du dispositif placé en aval,
- b) le temps de fonctionnement du dispositif placé en amont doit être supérieur à celui du dispositif placé en aval pour toutes les valeurs de courant de défaut.

La sélectivité totale peut être réalisée en utilisant, par exemple, un dispositif retardé pour celui placé en amont, et dont le courant différentiel-résiduel assigné est au moins égal à 3 fois celui du dispositif placé en aval.

Il y a lieu de s'assurer que le temps de coupure maximal de chaque dispositif satisfait aux conditions de protection définies en 411.3.2.

Les exemples ci-après montrent des illustrations des règles de la sélectivité totale.



Exemple de Sélectivité totale

Les dispositifs B (aval) et A (amont) ont des caractéristiques de fonctionnement telles que les deux conditions a) et b) sont satisfaites. Le dispositif situé en aval est un DDR de courant différentiel assigné égal à IΔn2=30 mA *Le dispositif en amont est un disjoncteur de branchement différentiel IΔn1=500* mA *de type «S».*

V-6.1 2 Sélectivité partielle (535.4.3.2)

Si l'une des conditions a et b n'est pas satisfaite, la sélectivité est partielle.

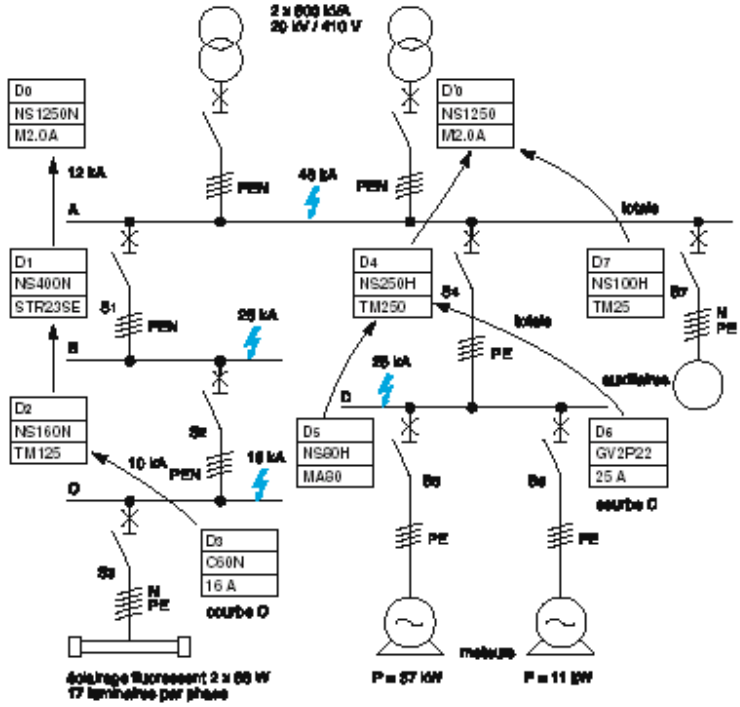
IΔn1< IΔn2 et t1>t2

IΔn1≥2IΔn2 et t2>t1

Les tableaux de sélectivité des **pages K150 à K200** permettent de déterminer les limites de sélectivité entre les différents étages reportés sur le schéma ci-dessus.
Les valeurs de sélectivité ne veulent rien dire dans l'absolu. Il faut les comparer aux valeurs de courant de court-circuit calculées ci-dessus.
La limite de sélectivité entre D0-D1 et D'0-D4 ou D'0-D7 est multipliée par le nombre de transformateurs en parallèle.
Exemple : la limite de sélectivité entre un NS1250N et NS400H est 12 kA,
dans notre cas elle est égale à 24 kA.

V-7 Mise en œuvre de la technique de filiation

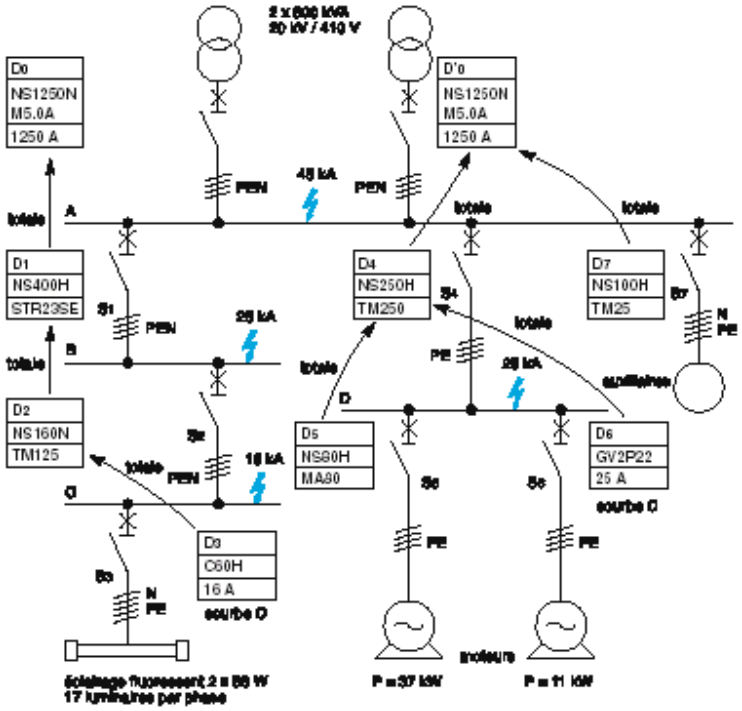
Avant d'améliorer les limites de sélectivité, nous pouvons améliorer le choix des dispositifs de protection en utilisant les tableaux de filiation **pages K216 à K220**.
Les limites de sélectivité avec ces nouveaux dispositifs sont reportées également sur le schéma ci-contre. La technique de filiation, dans le cas de transformateur en parallèle, est indiquée dans le tableau **page K221**. (le tableau n'est valable que pour les disjoncteurs de source et le disjoncteur placé en aval du jeu de barres principal. Après, utiliser les tableaux de filiation classique **pages K216 à K220**. On s'aperçoit que le niveau de la sélectivité n'a pas été amélioré. Par contre, l'économie réalisée est très importante sur le coût du matériel. Améliorer les limites de sélectivité conduit à une bonne exploitation de l'installation.



V-8 Optimisation de la sélectivité des protections (sélectivité chronométrique)

L'emploi de disjoncteurs sélectifs (équipés de déclencheurs électroniques Micrologic 5.0A) sur les départs de source permet :

- 1 de doubler la limite de sélectivité
- 2 de réaliser la sélectivité totale avec tous les départs en aval.



-

V-9 Sélectivité renforcée par coordination des disjoncteurs et de leurs protections

La sélectivité renforcée par coordination est réalisée par le choix des disjoncteurs et de leurs protections en amont et en aval

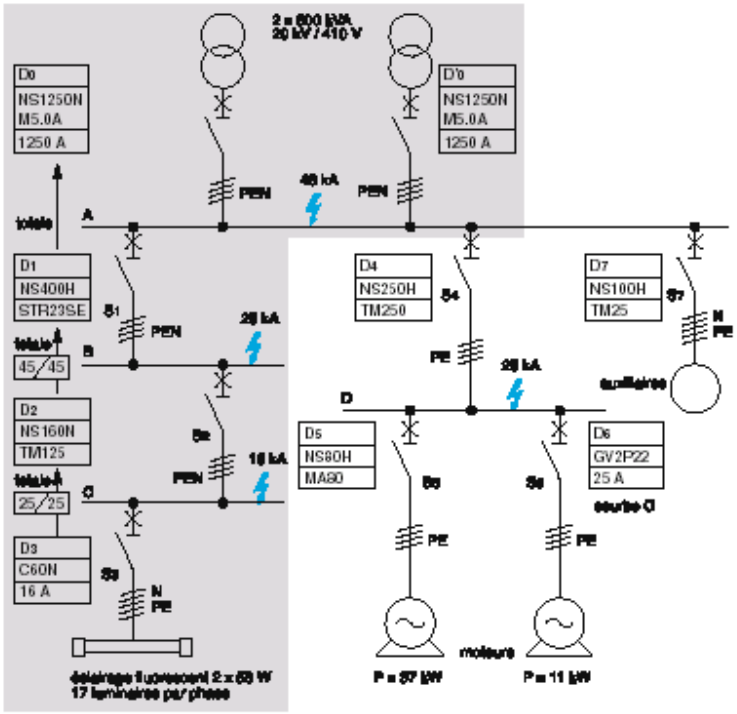
Les associations de disjoncteurs permettent :

- 1 de renforcer l'Icu du disjoncteur en aval
- 2 d'obtenir une sélectivité renforcée par la protection du disjoncteur en amont
- 3 de réaliser la sélectivité totale avec tous les départs en aval.

Les tableaux de sélectivité renforcée des **pages K201 à K211** permettent de déterminer les limites en coordination, du niveau de la sélectivité entre les différents étages reportés sur le schéma ci-contre. Concernant les limites entre D2 et D3, on s'aperçoit que :

- 1 la limite en coordination est de 25 kA eff.
- 2 la sélectivité renforcée est de 25 kA eff.

Le niveau de sélectivité a été amélioré, conduisant à une très bonne exploitation de l'installation.



V-10 Vérification de la protection des personnes

En schéma de liaisons à la terre TN, vérifier la longueur maximale de distribution accordée par les dispositifs de protection. Les tableaux des **pages K243 à K248** donnent, pour chaque appareil, la longueur maximale pour laquelle les personnes sont protégées. Nous prendrons le cœfficient **m** égal à 1.

10 Vérification de la protection des personnes

repère câbles	disjoncteurs		section (mm²)	longueur (m)	longueur maximale (m)
S1	NS400H	STR23SE	240	41	220
S2	NS160N	TM125	50	14	140
S3	C60N	16 A (C)	4	80	102
S4	NS250H	TM250	150	28	211
S5	NS80 H	MA80 A	16	50	56
S6	GV2P22	25 A	4	75	65[1)]
S7	NS100H	TM25	2,5	10	29

(1) La protection des personnes n’est pas assurée pour le câble S6 de section 4 mm2. Choisir une section supérieure, soit 6 mm2, qui conduit à une longueur maximale de 98 m, ou mettre un DDR, ou réaliser une liaison équipotentielle supplémentaire (des mesures doivent obligatoirement être effectuées dans ce cas).

Détermination des chutes de tension admissibles

La chute de tension en ligne en régime permanent est à prendre en compte pour l'utilisation du récepteur dans des conditions normales (limites fixées par les constructeurs des récepteurs).

Le tableau ci-contre donne les formules usuelles pour le calcul de la chute de tension.

Plus simplement, les tableaux ci-dessous donnent la chute de tension en % dans 100 m de câble, en 400 V/50 Hz triphasé, en fonction de la section du câble et du courant véhiculé (In du récepteur). Ces valeurs sont données pour un cos φ de 0,85 dans le cas d'un moteur et de 1 pour un récepteur non inductif. Ces tableaux peuvent être utilisés pour des longueurs de câble L ≠ 100 m : il suffit d'appliquer au résultat le coefficient L/100.

Calcul de la chute de tension en ligne en régime permanent

Formules de calcul de chute de tension

alimentation	chute de tension (V CA)	en %
monophasé : deux phases	$\Delta U = 2 I_e L (R \cos\varphi + X \sin\varphi)$	$100 \Delta U/Un$
monophasé : phase et neutre	$\Delta U = 2 I_e L (R \cos\varphi + X \sin\varphi)$	$100 \Delta U/Vn$
triphasé : trois phases (avec ou sans neutre)	$\Delta U = \sqrt{3}\ I_e L (R \cos\varphi + X \sin\varphi)$	$100 \Delta U/Un$

Un : tension nominale entre phases.
Vn : tension nominale entre phase et neutre.

Chute de tension dans 100 m de câble en 400 V/50 Hz triphasé (%)

cos φ = 0,85

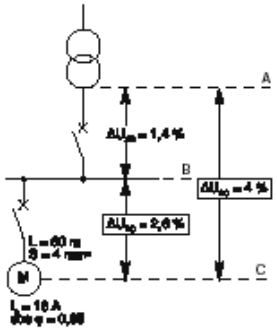
câble	cuivre																aluminium											
S (mm²)	1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240	300	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240	300
In (A)																												
1	0,5	0,4																										
2	1,1	0,6	0,4																									
3	1,5	1	0,6	0,4													0,4											
5	2,6	1,6	1	0,6	0,4												0,6	0,4										
10	5,2	3,2	2	1,4	0,8	0,5											1,3	0,8	0,5									
16	8,4	5	3,2	2,2	1,3	0,8	0,5										2,1	1,3	0,8	0,6								
20		6,3	4	2,6	1,6	1	0,6										2,5	1,6	1,1	0,7	0,5							
25		7,9	5	3,3	2	1,3	0,8	0,6									3,2	2	1,3	0,9	0,6	0,5						
32			6,3	4,2	2,6	1,6	1,1	0,8	0,5								4,1	2,6	1,6	1,2	0,9	0,6	0,5					
40			7,9	5,3	3,2	2,1	1,4	1	0,7	0,5							5,1	3,2	2,1	1,5	1,1	0,8	0,6	0,5				
50				6,7	4,1	2,5	1,6	1,2	0,9	0,6	0,5						6,4	4,1	2,6	1,9	1,4	1	0,7	0,6	0,5			
63				8,4	5	3,2	2,1	1,5	1,1	0,8	0,6						8	5	3,2	2,3	1,7	1,3	0,9	0,8	0,6			
70					5,6	3,5	2,3	1,7	1,3	0,9	0,7	0,5						5,6	3,6	2,6	1,9	1,4	1,1	0,8	0,7			
80					6,4	4,1	2,6	1,9	1,4	1	0,8	0,6	0,5					6,4	4,1	3	2,2	1,5	1,2	1	0,8			
100					8	5	3,3	2,4	1,7	1,3	1	0,8	0,7	0,65					5,2	3,8	2,7	2	1,5	1,3	1	0,95		
125						4,4	4,1	3,1	2,2	1,6	1,3	1	0,9	0,21	0,76				6,5	4,7	3,3	2,4	1,9	1,5	1,3	1,2	0,95	
160							5,3	3,9	2,8	2,1	1,6	1,4	1,1	1	0,97	0,77				6	4,3	3,2	2,4	2	1,6	1,52	1,2	1
200							6,4	4,9	3,5	2,6	2	1,6	1,4	1,3	1,22	0,96					5,6	4	3	2,4	2	1,9	1,53	1,3
250								6	4,3	3,2	2,5	2,1	1,7	1,6	1,53	1,2					6,8	5	3,8	3,1	2,5	2,4	1,9	1,6
320									5,6	4,1	3,2	2,6	2,3	2,1	1,95	1,54						6,3	4,8	3,9	3,2	3	2,5	2,1
400									6,9	5,1	4	3,3	2,8	2,6	2,44	1,92							5,9	4,9	4,1	3,8	3	2,6
500										6,5	5	4,1	3,5	3,2	3	2,4								6,1	5	4,7	3,8	3,3

cos φ = 1

câble	cuivre																aluminium											
S (mm²)	1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240	300	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240	300
In (A)																												
1	0,6	0,4																										
2	1,3	0,7	0,5																									
3	1,9	1,1	0,7	0,5													0,5											
5	3,1	1,9	1,2	0,8	0,5												0,7	0,5										
10	6,1	3,7	2,3	1,5	0,9	0,5											1,4	0,9	0,6									
16	10,7	5,9	3,7	2,4	1,4	0,9	0,6										2,3	1,4	1	0,7								
20		7,4	4,6	3,1	1,9	1,2	0,7										3	1,9	1,2	0,8	0,6							
25		9,3	5,8	3,9	2,3	1,4	0,9	0,6									3,7	2,3	1,4	1,1	0,7	0,5						
32			7,4	5	3	1,9	1,2	0,8	0,6								4,8	3	1,9	1,4	1	0,7	0,5					
40			9,3	6,1	3,7	2,3	1,4	1,1	0,7	0,5							5,9	3,7	2,3	1,7	1,2	0,8	0,6	0,5				
50				7,7	4,6	2,9	1,9	1,4	0,9	0,6	0,5						7,4	4,6	3	2,1	1,4	1,1	0,8	0,6	0,5			
63				9,7	5,9	3,6	2,3	1,6	1,2	0,8	0,6						9	5,9	3,7	2,7	1,9	1,4	1	0,8	0,7	0,6		
70					6,5	4,1	2,6	1,9	1,3	0,9	0,7	0,5						6,5	4,1	3	2,1	1,4	1,1	0,9	0,8	0,7		
80					7,4	4,6	3	2,1	1,4	1,1	0,8	0,6	0,5					7,4	4,8	3,4	2,3	1,7	1,3	1	0,9	0,8	0,6	
100					9,3	5,8	3,7	2,6	1,9	1,4	1	0,8	0,7	0,6					5,9	4,2	3	2,1	1,5	1,3	1,2	1	0,8	0,6
125						7,2	4,6	3,3	2,3	1,6	1,2	1	0,9	0,7	0,6				7,4	5,3	3,7	2,6	2	1,5	1,4	1,3	1	0,8
160							5,9	4,2	3	2,1	1,5	1,3	1,2	1	0,8	0,6				6,8	4,8	3,4	2,5	2	1,8	1,6	1,3	1,1
200							7,4	5,3	3,7	2,6	2	1,5	1,4	1,3	1	0,8					5,9	4,2	3,2	2,4	2,3	2	1,6	1,4
250								6,7	4,6	3,3	2,4	1,9	1,7	1,4	1,2	0,9					7,4	5,3	3,9	3,1	2,8	2,5	2	1,6
320									5,9	4,2	3,2	2,4	2,3	1,9	1,5	1,2						6,8	5	4	3,6	3,2	2,5	2
400									7,4	5,3	3,9	3,1	2,8	2,3	1,9	1,4							6,2	5	4,5	4	3,2	2,7
500										6,7	4,9	3,9	3,5	3	2,5	1,9							7,7	6,1	5,7	5	4	3,3

Pour un réseau triphasé 230 V, multiplier ces valeurs par $\sqrt{3}$ = 1,73.
Pour un réseau monophasé 230 V, multiplier ces valeurs par 2.

Exemple d'utilisation des tableaux



Un moteur triphasé 400 V, de puissance 7,5 kW (I_n = 15 A) cos φ = 0,85 est alimenté par 80 m de câble cuivre triphasé de section 4 mm².
La chute de tension entre l'origine de l'installation et le départ moteur est évaluée à 1,4 %.
La chute de tension totale en régime permanent dans la ligne est-elle admissible ?

Réponse :
pour L = 100 m, le tableau page précédente donne :
ΔU_{AC} = 3,2 %
Pour L = 80 m, on a donc :
ΔU_{AC} = 3,2 x (80/100) = 2,6 %
La chute de tension entre l'origine de l'installation et le moteur vaut donc :
$\Delta U_{AC} = \Delta U_{AB} + \Delta U_{BC}$
ΔU_{AC} = 1,4 % + 2,6 % = 4 %
La plage de tension normalisée de fonctionnement des moteurs (± 5 %) est respectée (transfo. MT/BT 400 V en charge).

Attention :
la tension nominale de service qui était de 220/380 V est en train d'évoluer (harmonisation internationale et arrêté français du 29/05/86). La nouvelle tension normalisée est 230/400 V.
Les fabricants de transformateurs HT/BT ont augmenté depuis peu la tension BT qui devient :
- à vide : 237/410 V
- à pleine charge : 225/390 V

Elle devrait passer dans quelques années à 240/420 V (à vide) et 230/400 V (en charge). La tension nominale des récepteurs devrait évoluer de la même façon.
En attendant, il faut calculer les chutes de tension en tenant compte de cette évolution.
Les cas dangereux pour les moteurs :
- "nouveau" transformateur peu chargé et vieux moteur : risque de tension trop élevée
- "ancien" transformateur chargé à 100 % et nouveau moteur : risque de tension trop faible.

Détermination des chutes de tension admissibles

Pour qu'un moteur démarre dans des conditions normales, le couple qu'il fournit doit dépasser 1,7 fois le couple résistant de la charge.
Or, au démarrage, le courant est très supérieur au courant en régime permanent.
Si la chute de tension en ligne est alors importante, le couple du démarrage diminue de façon significative.
Cela peut aller jusqu'au non-démarrage du moteur.

Chute de tension en ligne au démarrage d'un moteur : risque de démarrage difficile

Exemple :
- sous une tension réelle de 400 V, un moteur fournit au démarrage un couple égal à 2,1 fois le couple résistant de sa charge
- pour une chute de tension au démarrage de 10 %, le couple fourni devient : $2,1 \times (1 - 0,1)^2 = 1,7$ fois le couple résistant.

Le moteur démarre correctement.
- pour une chute de tension au démarrage de 15 % le couple fourni devient : $2,1 \times (1 - 0,15)^2 = 1,5$ fois le couple résistant.

Le moteur risque de ne pas démarrer ou d'avoir un démarrage très long.
En valeur moyenne, il est conseillé de limiter la chute de tension au démarrage à une valeur maximum de 10 %.

Calcul de la chute de tension au démarrage

Par rapport au régime permanent, le démarrage d'un moteur augmente :
- la chute de tension ΔU_{AB} en amont du départ moteur. Celle-ci est ressentie par le moteur mais aussi par les récepteurs voisins
- la chute de tension ΔU_{AC} dans la ligne du moteur.

Cette chute de tension doit être évaluée pour :
- vérifier que les perturbations provoquées sur les départs voisins sont acceptables
- calculer la chute de tension effective aux bornes du moteur au démarrage.

Le tableau ci-contre permet de connaître la chute de tension au point B au moment du démarrage : il donne une bonne approximation du coefficient de majoration k_g en fonction du rapport de la puissance de la source et de la puissance du moteur.

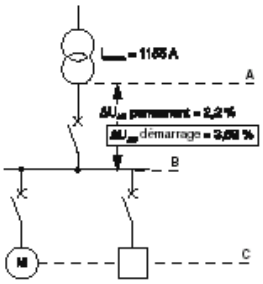
Chute de tension au démarrage en amont du départ moteur

Coefficient de majoration de la chute de tension en amont du départ du moteur au démarrage (voir exemple ci-dessous)

		démarrage						
		étoile triangle		direct				
Id/In		2	3	4	5	6	7	8
Isource/Id	2	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50
	4	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75
	6	1,17	1,34	1,50	1,67	1,84	2,00	2,17
	8	1,13	1,25	1,38	1,50	1,63	1,75	1,88
	10	1,10	1,23	1,34	1,45	1,56	1,67	1,78
	15	1,07	1,14	1,20	1,27	1,34	1,40	1,47

Ce tableau a été établi en négligeant le cos φ transitoire de l'installation au moment du démarrage du moteur. Néanmoins, il donne une bonne approximation de la chute de tension au moment du démarrage.
Pour un calcul plus précis il faudra intégrer le cos φ au démarrage.
Cette remarque s'applique surtout quand $I_{source} = 2I_{n\,moteur}$

Exemple d'utilisation du tableau



Pour un moteur de 18,5 kW (In = 35 A, Id = 175 A), le courant total disponible à la source est : $I_{source} = 1\,155$ A.
La chute de tension ΔU_{AB} en régime permanent est 2,2 %.
Quelle est la chute de tension ΔU_{AC} au démarrage du moteur ?

Réponse :
$I_{source}/I_d = 1\,155/175 = 6,6$.
Le tableau donne pour $I_{source}/I_d = 6$ et $I_d/I_n = 5$:
$k_g = 1,67$.
On a donc :
$\Delta U_{AB\,démarrage} = 2,2 \times 1,67 = 3,68$ %
Ce résultat est tout à fait admissible pour les autres récepteurs.

Chute de tension au démarrage aux bornes du moteur

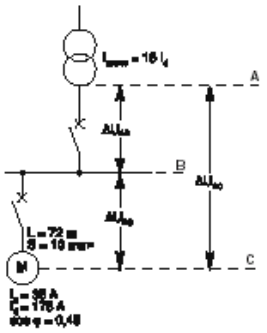
La chute de tension en ligne au démarrage est fonction du facteur de puissance cos φ du moteur à sa mise sous tension.
La norme IEC 947-4-1 définit les limites extrêmes de ce facteur de puissance en fonction de l'intensité nominale du moteur :
- pour $I_n \leqslant 100$ A, cos φ ⩽ 0,45
- pour $I_n > 100$ A, cos φ ⩽ 0,35.

Le tableau ci-dessous donne la chute de tension en % dans 1 km de câble parcouru par 1 A, en fonction de la section du câble et du cos φ du moteur.
La chute de tension au démarrage (en %) dans un circuit moteur s'en déduit par :
ΔU (en %) = $k_1 \times I_d \times L$
k_1 : valeur donnée par le tableau ci-dessous
I_d : courant de démarrage du moteur (en A)
L : longueur du câble en km.

Chute de tension au démarrage dans 1 km de câble parcouru par 1 A (en %)

	câble cuivre													câble aluminium							
S (mm²)	1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120	150	10	16	25	35	50	70	95	120	150
cos φ du moteur																						
au démarrage																						
0,35	2,43	1,45	0,93	0,63	0,39	0,26	0,18	0,14	0,11	0,085	0,072	0,064	0,058	0,61	0,39	0,26	0,20	0,15	0,12	0,09	0,082	0,072
0,45	3,11	1,88	1,19	0,80	0,49	0,32	0,22	0,16	0,12	0,098	0,081	0,071	0,063	0,77	0,49	0,33	0,24	0,18	0,14	0,11	0,094	0,082
en régime établi*																						
0,85	5,83	3,81	2,20	1,47	0,89	0,56	0,37	0,27	0,19	0,144	0,111	0,092	0,077	1,41	0,89	0,58	0,42	0,30	0,22	0,17	0,135	0,112

(*) La dernière ligne de ce tableau permet le calcul de la chute de tension en régime établi (cos φ à charge nominale) avec la même formule en remplaçant I_d par I_n moteur.



Exemple d'utilisation du tableau
Un moteur de 18,5 kW (In = 35 A et Id = 5 x In = 175 A) est alimenté par un câble de cuivre triphasé, de section 10 mm², de longueur 72 m. Son cos φ au démarrage est 0,45. La chute de tension au dernier niveau de distribution est égale à 2,4 % et $I_{SOURCE}/I_d = 15$.
Quelle est la chute de tension totale en régime établi et la chute de tension totale au démarrage ?

Réponse :
- d'après le tableau ci-dessus (dernière ligne), la chute de tension dans la ligne moteur en régime établi vaut :

$\Delta U_{BC} = 0,89 \times 35 \times 0,072 = 2,24$ %
$\Delta U_{AC} = \Delta U_{AB} + \Delta U_{BC}$
$\Delta U_{AC} = 2,4$ % + 2,24 % = 4,64 %
Ce résultat est tout à fait acceptable pour le fonctionnement du moteur.

- d'après le tableau ci-dessus, la chute de tension dans la ligne moteur au démarrage vaut :

$\Delta U_{BC} = 0,49 \times 175 \times 0,072 = 6,17$ %
$\Delta U_{AC} = \Delta U_{BC} + (\Delta U_{AB} \times k2)$ (voir tableau page précédente)
$\Delta U_{AC} = 6,17 + (2,4 \times 1,27) = 9,22$ %
Ce résultat est admissible pour un démarrage correct du moteur.

Détermination des courants de court-circuits (Icc)

Déterminer résistances et réactances de chaque partie de l'installation

partie de l'installation	valeurs à considérer résistances (mΩ)	réactances (mΩ)
réseau amont(1)	$R1 = 0,1 \times Z_{tj}$	$X1 = 0,995\ Z_{tj}$ $Z_{tj} = \frac{(m\ U_n)^2}{S_{kj2}}$
tranformateur	$R2 = \frac{Wc \times U^2}{S^2} 10^{-3}$ Wc = pertes cuivre (W) S = puissance apparente du transformateur (kVA)	$X2 = \sqrt{Z^2 - R^2}$ $Z = \frac{Ucc}{100} \times \frac{U^2}{S}$ Ucc = tension de court-circuit du transfo (en %)
liaison		
en câbles(2)	$R3 = \rho \frac{L}{S}$(3) ρ = 18,51 (Cu) ou 29,41 (Al) L en m, S en mm²	X3 = 0,09L (câbles unijointifs) X3 = 0,12L(3) (câbles uniespacés) L en m
en barres	$R3 = \rho \frac{L}{S}$(3) ρ = 18,51 (Cu) ou 29,41 (Al) L en m, S en mm²	X3 = 0,15L(4) L en m
disjoncteur		
rapide	R4 négligeable	X4 négligeable
selectif	R4 négligeable	X4 négligeable

(1) S_{kj2} : puissance de court-circuit du réseau à haute tension en kVA.
(2) Réactance linéique des conducteurs en fonction de la disposition des câbles et des types.
(3) S'il y a plusieurs conducteurs en parallèle par phase diviser la résistance et la réactance d'un conducteur par le nombre de conducteurs. R est négligeable pour les sections supérieures à 240 mm².
(4) Réactance linéique des jeux de barres (Cu ou AL) en valeurs moyennes.

Icc en un point quelconque de l'installation

Valeur de l'Icc en un point de l'installation par la méthode suivante :
(méthode utilisée par le logiciel Ecodial 3 en conformité avec la norme NF C 15-500).

1. calculer :
la somme Rt des résistances situées en amont de ce point :
Rt = R1 + R2 + R3 + ... et la somme Xt des réactances situées en amont de ce point :
Xt = X1 + X2 + X3 + ...

2. calculer :
$Icc\ maxi. = \frac{mc\ U_n}{\sqrt{3}\sqrt{Rt^2 + Xt^2}}$ kA.
Rt et Xt exprimées en mΩ

Important :
- U_n = tension nominale entre phases du transformateur (400 V)
- m = facteur de charge à vide = 1,05
- c = facteur de tension = 1,05.

Exemple

schéma	partie de l'installation	résistances (mΩ)	réactances (mΩ)
	réseau amont S_{kj2}(1) = 500000 kVA	$R1 = \frac{(1,05 \times 400)^2}{500\,000} \times 0,1$ R1 = 0,035	$R1 = \frac{(1,05 \times 400)^2}{500\,000} \times 0,995$ X1 = 0,351
	transformateur S_{tr} = 630 kVA U_{cc} = 4 % U = 420 V P_{cu} = 6 300 W	$R2 = \frac{7\,900 \times 420^2 \times 10^{-3}}{630^2}$ R2 = 3,5	$X2 = \sqrt{\left(\frac{4}{100} \times \frac{420^2}{630}\right)^2 - (3,5)^2}$ X2 = 10,6
	liaison (câbles) transformateur disjoncteur 3 x (1 x 150 mm²) Cu par phase L = 5 m	$R3 = \frac{18,51 \times 5}{150 \times 3}$ R3 = 0,20	$X3 = 0,09 \times \frac{5}{3}$ X3 = 0,15
M1	disjoncteur rapide	R4 = 0	X4 = 0
1 2 3	liaison disjoncteur depart 2 barres (CU) 1 x 80 x 5 mm² par phase L = 2 m	$R5 = \frac{18,51 \times 2}{400}$ R5 = 0,09	X5 = 0,15 x 2 X5 = 0,30
M2	disjoncteur rapide	R6 = 0	X6 = 0
tableau secondaire M3	liaison (câbles) tableau général BT tableau secondaire 1 x (1 x 185 mm²) Cu par phase L = 70 m	$R7 = 18,51 \times \frac{70}{185}$ R7 = 7	X7 = 0,13 x 70 X7 = 9,1

Calcul des intensités de court-circuit (kA)

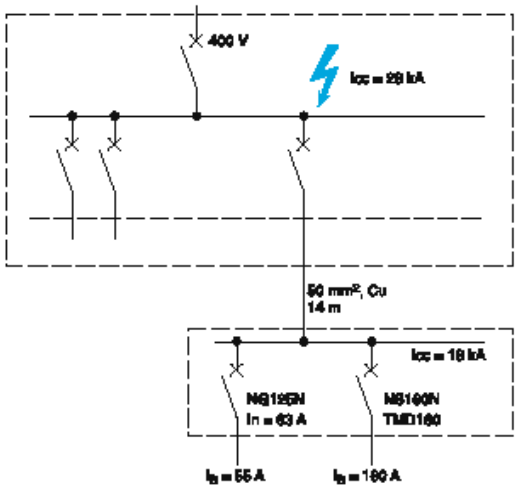
	résistances (mΩ)	réactances (mΩ)	Icc (kA)
en M1	Rt1 = R1 + R2 + R3 Rt1 = 3,73	Xt1 = X1 + X2 + X3 Xt1 = 11,10	$\frac{1,05 \times 1,05 \times 400}{\sqrt{3}\ \sqrt{(3,73)^2 + (11,1)^2}} = 21,7$ kA
en M2	Rt2 = Rt1 + R4 + R5 Rt2 = 3,82	Xt2 = Xt1 + X4 + X5 Xt2 = 11,40	$\frac{1,05 \times 1,05 \times 400}{\sqrt{3}\ \sqrt{(3,82)^2 + (11,40)^2}} = 21,2$ kA
en M3	Rt3 = Rt2 + R6 + R7 Rt3 = 10,82	Xt3 = Xt2 + X6 + X7 Xt3 = 20,50	$\frac{1,05 \times 1,05 \times 400}{\sqrt{3}\ \sqrt{(10,82)^2 + (20,50)^2}} = 11,0$ kA

Evaluation du Icc aval en fonction du Icc amont

Les tableaux page suivante donnent rapidement une bonne évaluation de l'intensité de court-circuit aval en un point du réseau connaissant :
- l'intensité de court-circuit amont
- la longueur, la section et la constitution du câble aval.

Il suffit ensuite de choisir un disjoncteur ayant un pouvoir de coupure supérieur à l'Icc aval.
Si l'on désire des valeurs plus précises, il est possible de réaliser un calcul détaillé (comme indiqué en page K48 ou d'utiliser le logiciel Ecodial 3.
En outre, la technique de filiation permet, si un disjoncteur limiteur est placé en amont, d'installer, en aval, des disjoncteurs de pouvoir de coupure inférieur au courant de court-circuit présumé (voir page K213).

Exemple
Soit un réseau représenté sur la figure ci-dessous.
Sur le tableau page suivante des conducteurs cuivre, pour la ligne correspondant à la section du câble, soit 50 mm², choisir la valeur la plus proche, par défaut, de la longueur du câble, ici 14 m.
L'intersection de la colonne comportant cette valeur avec la ligne correspondant à la valeur la plus proche, par excès, de l'intensité de court-circuit aval, ici la ligne 30 kA, indique la valeur du courant de court-circuit recherchée, soit Icc = 18 kA.
Installer un disjoncteur Multi 9 NG125N calibre 63 A (PdC 25 kA) pour le départ 55 A et un disjoncteur Compact NS160N calibre 160 A (PdC 35 kA) pour le départ 160 A.



Détermination des courants de court-circuits (Icc)

Cuivre (réseau 400 V)

section des conducteurs de phase (mm²)	longueur de la canalisation (en m)																					
1,5													1,3	1,8	2,6	3,6	5,1	7,3	10,3	15	21	
2,5												1,1	1,5	2,1	3,0	4,3	6,1	8,6	12	17	24	34
4												1,7	1,9	2,6	3,7	5,3	7,4	10,5	15	21	30	42
6											1,4	2,0	2,8	4,0	5,6	7,9	11,2	16	22	32	45	63
10										2,1	3,0	4,3	6,1	8,6	12,1	17	24	34	48	68	97	137
16									1,7	2,4	3,4	4,8	6,8	9,7	14	19	27	39	55	77	110	155	219
25							1,3	1,9	2,7	3,8	5,4	7,6	10,7	15	21	30	43	61	86	121	171	242	342
35							1,9	2,6	3,7	5,3	7,5	10,6	15	21	30	42	60	85	120	170	240	339	479
50						1,8	2,5	3,6	5,1	7,2	10,2	14	20	29	41	58	81	115	163	230	325	460	
70						2,6	3,7	5,3	7,5	10,6	15	21	30	42	60	85	120	170	240	339			
95				2,5	3,6	5,1	7,2	10,2	14	20	29	41	58	81	115	163	230	325	460				
120		1,6	2,3	3,2	4,5	6,4	9,1	13	18	26	36	51	73	103	145	205	291	311					
150	1,2	1,7	2,5	3,5	4,9	7,0	9,9	14	20	28	39	56	79	112	158	223	316	447					
185	1,5	2,1	2,9	4,1	5,8	8,2	11,7	16	23	33	47	66	93	132	187	264	373	528					
240	1,8	2,6	3,6	5,1	7,3	10,3	15	21	29	41	58	82	116	164	232	329	465	658					
300	2,2	3,1	4,4	6,2	8,7	12,3	17	25	35	49	70	99	140	198	279	395	559						
2 x 120	2,3	3,2	4,5	6,4	9,1	12,8	18	26	36	51	73	103	145	205	291	411	581						
2 x 150	2,5	3,5	4,9	7,0	9,9	14,0	20	28	39	56	79	112	158	223	316	447	632						
2 x 185	2,9	4,1	5,8	8,2	11,7	16,5	23	33	47	66	93	132	187	264	373	528	747						
Icc amont (en kA)	Icc aval																					
50	47,7	47,7	46,8	45,6	43,9	41,8	39,2	36,0	32,2	28,1	23,8	19,5	15,6	12,1	9,2	6,9	5,1	3,7	2,7	1,9	1,4	1,0
40	38,5	38,5	37,9	37,1	36,0	34,6	32,8	30,5	27,7	24,6	21,2	17,8	14,5	11,4	8,8	6,7	5,0	3,6	2,6	1,9	1,4	1,0
35	33,8	33,8	33,4	32,8	31,9	30,8	29,3	27,5	25,2	22,6	19,7	16,7	13,7	11,0	8,5	6,5	4,9	3,6	2,6	1,9	1,4	1,0
30	29,1	29,1	28,8	28,3	27,7	26,9	25,7	24,3	22,5	20,4	18,0	15,5	12,9	10,4	8,2	6,3	4,8	3,5	2,6	1,9	1,4	1,0
25	24,4	24,4	24,2	23,8	23,4	22,8	22,0	20,9	19,6	18,0	16,1	14,0	11,9	9,8	7,8	6,1	4,6	3,4	2,5	1,9	1,3	1,0
20	19,6	19,6	19,5	19,2	19,0	18,6	18,0	17,3	16,4	15,2	13,9	12,3	10,6	8,9	7,2	5,7	4,4	3,3	2,5	1,8	1,3	1,0
15	14,8	14,8	14,7	14,6	14,4	14,2	13,9	13,4	12,9	12,2	11,3	10,2	9,0	7,7	6,4	5,2	4,1	3,2	2,4	1,8	1,3	0,9
10	9,9	9,9	9,9	9,8	9,7	9,6	9,5	9,3	9,0	8,6	8,2	7,6	6,9	6,2	5,3	4,4	3,6	2,9	2,2	1,7	1,2	0,9
7	7,0	7,0	6,9	6,9	6,9	6,8	6,7	6,6	6,5	6,3	6,1	5,7	5,3	4,9	4,3	3,7	3,1	2,5	2,0	1,6	1,2	0,9
5	5,0	5,0	5,à	5,0	4,9	4,9	4,9	4,8	4,7	4,6	4,5	4,3	4,1	3,8	3,5	3,1	2,7	2,2	1,8	1,4	1,1	0,8
4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	3,9	3,9	3,9	3,8	3,8	3,7	3,6	3,4	3,2	3,0	2,7	2,3	2,0	1,7	1,3	1,0	0,8
3	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	2,9	2,9	2,9	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	2,2	2,0	1,7	1,5	1,2	1,0	0,8
2	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,7	1,6	1,5	1,3	1,2	1,0	0,8	0,7
1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7	0,6	0,5

Alu (réseau 400 V)

section des conducteurs de phase (mm²)	longueur de la canalisation (en m)																					
10											1,5	2,1	2,9	4,1	5,8	8,2	11,6	16	23	33	47	66
16										2,2	3,0	4,3	6,1	8,6	12	17	24	34	49	69	98	138
25								1,7	2,4	3,4	4,8	6,7	9,5	13	19	27	38	54	76	108	152	216
35							1,7	2,4	3,3	4,7	6,7	9,4	13	19	27	38	53	75	107	151	213	302
50						1,6	2,3	3,2	4,5	6,4	9,0	13	18	26	36	51	72	102	145	205	290	410
70						2,4	3,3	4,7	6,7	9,4	13	19	27	38	53	75	107	151	213	302	427	
95					2,3	3,2	4,5	6,4	9,0	13	18	26	36	51	72	102	145	205	290	410		
120					2,9	4,0	5,7	8,1	11,4	16	23	32	46	65	91	129	183	259	366			
150					3,1	4,4	6,2	8,8	12	18	25	35	50	70	99	141	199	281	398			
185				2,6	3,7	5,2	7,3	10,4	15	21	29	42	59	83	117	166	235	332	470			
240		1,6	2,3	3,2	4,6	6,5	9,1	13	18	26	37	52	73	103	146	207	293	414				
300	1,4	1,9	2,7	3,9	5,5	7,8	11	16	22	31	44	62	88	124	176	249	352	497				
2 x 120	1,4	2,0	2,9	4,0	5,7	8,1	11,4	16	23	32	46	65	91	129	183	259	366	517				
2 x 150	1,6	2,2	3,1	4,4	6,2	8,8	12	18	25	35	50	70	99	141	199	281	398					
2 x 185	1,8	2,6	3,7	5,2	7,3	10,4	15	21	29	42	59	83	117	166	235	332	470					
2 x 240	2,3	3,2	4,6	6,5	9,1	13	18	26	37	52	73	103	146	207	293	414	585					

Nota : Pour une tension triphasée de 230 V entre phases, diviser les longueurs ci-dessus par $\sqrt{3}$ = 1,732.

Choix des dispositifs de protection

Le choix d'un disjoncteur doit se faire en fonction :
- des caractéristiques du réseau sur lequel il est installé
- de la continuité de service désirée
- des diverses règles de protection à respecter.

Caractéristiques du réseau

Tension
La tension nominale du disjoncteur doit être supérieure ou égale à la tension entre phases du réseau.

Fréquence
La fréquence nominale du disjoncteur doit correspondre à la fréquence du réseau. Les appareils Merlin Gerin fonctionnent indifféremment aux fréquences de 50 ou 60 Hz (pour une utilisation sur réseau 400 Hz, voir pages K78 à K80, pour utilisation sur réseau à courant continu, voir pages K74 à K77).

Intensité
L'intensité de réglage ou le calibre du déclencheur du disjoncteur doit être supérieur au courant permanent véhiculé par l'artère sur laquelle il est installé et doit être inférieur au courant admissible par cette artère (voir page K90 pour les installations domestiques).

Pouvoir de coupure
Le pouvoir de coupure du disjoncteur doit être au moins égal au courant de court-circuit triphasé susceptible de se produire à l'endroit où il est installé. Une méthode permettant de déterminer le courant de court-circuit en un point de l'installation est présentée pages K48 à K50.
Dérogation : le pouvoir de coupure du disjoncteur peut être inférieur au courant de court-circuit, s'il existe en amont un dispositif :
- possédant le pouvoir de coupure correspondant au courant de court-circuit au point du réseau où il est installé
- limitant la contrainte thermique I^2t à une valeur inférieure à celle admissible par le disjoncteur et la canalisation protégée (voir courbes de limitation pages K338 à K346 et filiation page K213).

Nombre de pôles
Les schémas des liaisons à la terre ou régime de neutre (TT, TN, IT) et la fonction requise (protection, commande, sectionnement) déterminent le nombre de pôles (voir page K234).

Continuité de service

En fonction des impératifs de continuité de service (règlements de sécurité, contraintes d'exploitation, etc.), l'installateur peut, pour un réseau donné, être amené à choisir des disjoncteurs assurant :
- soit une sélectivité totale entre deux appareils installés en série
- soit une sélectivité partielle (voir page K147).

Règles de protection

Protection des personnes contre les contacts indirects
Les mesures de protection contre les contacts indirects par coupure automatique de l'alimentation dépendent du choix du schéma de liaison à la terre (voir pages K230 à K233) :
- en schéma TT (voir schéma type, pages K236 et K237), la protection est assurée par les dispositifs différentiels à courant résiduel (voir pages K238 et K239).
- en schéma TN (voir schéma type, page K242) ou IT (voir schéma type, pages K249 et K250), la protection est en général assurée par les dispositifs de protection contre les courts-circuits. Le courant de réglage de ces appareils détermine, compte tenu des règlements en vigueur, la longueur maximale des câbles en fonction de leur section (voir pages K243 à K248 et K257 à K262).
- en schéma IT, le réseau doit être surveillé par un contrôleur permanent d'isolement (voir pages K251 et K252).

Protection des câbles
Le disjoncteur, en cas de court-circuit ne doit laisser passer qu'une énergie inférieure à celle que peut supporter le câble. Cette vérification s'effectue en comparant la caractéristique I^2t du dispositif de protection à la contrainte thermique que peut supporter le câble (voir pages K338 à K346)
Dans le cas particulier des gaines préfabriquées Canalis de Télémécanique, des tableaux de coordination indiquent les disjoncteurs qui peuvent être associés aux gaines Canalis et le courant de court-circuit maximum pour lequel la gaine est protégée (voir page K101).

Protection de divers constituants électriques
Certains constituants nécessitent des protections possédant des caractéristiques spéciales. C'est le cas des transformateurs BT/BT (voir page K91), des batteries de condensateurs (voir page K269), des démarreurs de moteurs (voir pages K115) et des générateurs (voir pages K81 et K82).