

---

# Distribution Basse Tension

- ◆ Structure d'une installation de distribution de l'énergie électrique.
- ◆ Choix des protections électriques d'une installation.
- ◆ Choix de canalisations électriques.

## **Objectifs :**

- justifier le choix des caractéristiques d'un disjoncteur
- choisir la section d'un conducteur

## **Pré-requis :**

- lecture de schémas électriques unifilaires

## **Savoirs associés :**

- lire et décoder des notices de constructeurs.

---

# Sommaire

## **1. Disjoncteur Basse Tension (Disj B.T)**

- 1.1 Fonctions et caractéristiques
- 1.2 Types, domaines d'applications, courbes de déclenchement
- 1.3 Présentation de disjoncteurs
- 1.4 Sélectivité entre disjoncteurs
- 1.5 Courbes de limitation

## **2. Calcul de l'intensité de court-circuit en un point d'une installation**

- 2.1 Calcul du courant de court-circuit par la méthode des impédances
- 2.2 Applications numériques

## **3. Circuits électriques : détermination de la section des conducteurs**

- 3.1 Méthodologie
- 3.2 Définitions : courant d'emploi, courant admissible, surintensité
- 3.3 Détermination pratique de la section minimale d'une canalisation
- 3.4 Détermination de la chute de tension
- 3.5 Tableaux récapitulatifs
- 3.6 Exercice d'application

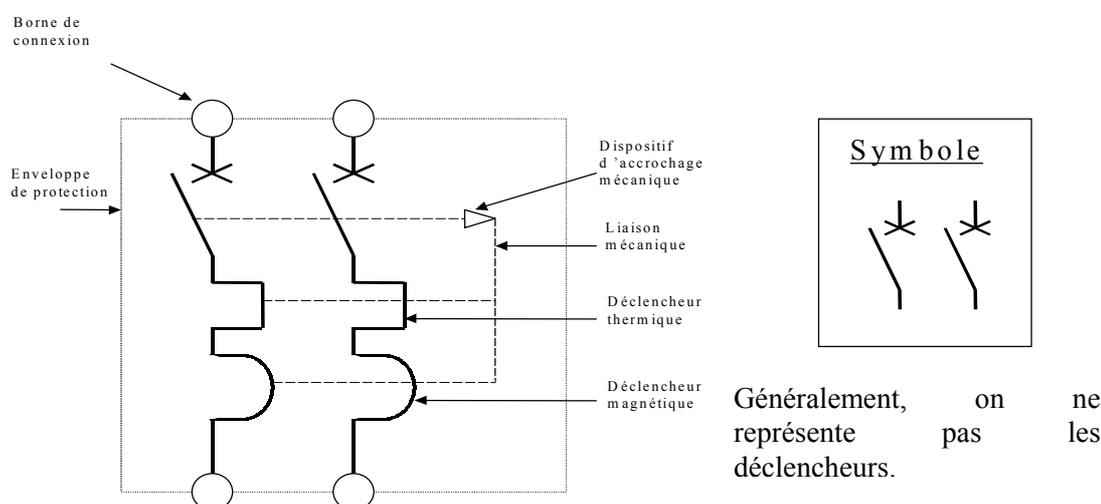
Une installation électrique Basse Tension (B.T) est régie par des textes classés en deux catégories :

- les textes réglementaires (décrets ou arrêtés) relatifs à la protection des travailleurs dans les établissements qui mettent en œuvre des courants électriques.
- les textes normatifs (règles de conception) : norme NFC-15-100.

## 1. Disjoncteur Basse Tension

### 1.1 Fonctions et caractéristiques

- ◆ Un disjoncteur est un appareil mécanique de connexion capable d'établir, de supporter et d'interrompre un courant dans un circuit électrique
- ◆ Constitution générale (cas d'un disjoncteur bipolaire : 2 pôles protégés).



Un disjoncteur protège l'installation :

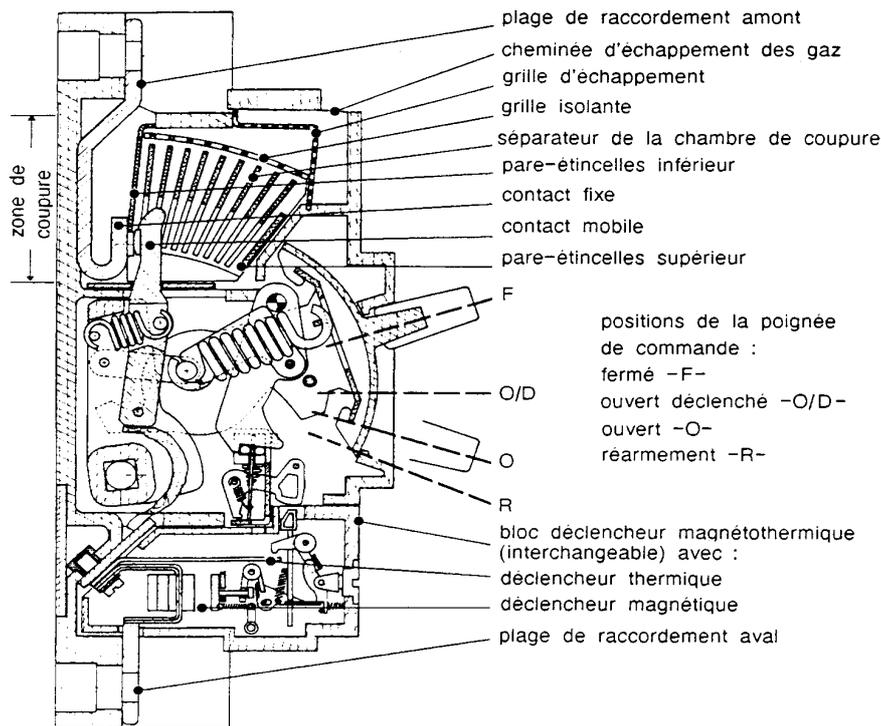
- contre les surcharges (action du déclencheur thermique)
- contre les courts-circuits (action du déclencheur magnétique)

☛ Un disjoncteur est capable d'interrompre un circuit quelque soit le courant qui le traverse jusqu'à son pouvoir de coupure ultime : Icu exprimé en kA (norme CEI.947-2).

- ◆ Les déclencheurs sont de deux sortes :

- les déclencheurs « magnéto-thermiques » : en condition de surcharge, l'échauffement significatif fonction de l'intensité provoque le déclenchement grâce à un élément « thermo-mécanique » : le bilame. En condition de court-circuit, à partir d'une certaine intensité (supérieure au courant de surcharge), le déclenchement est assuré quasi instantanément par un circuit magnétique qui actionne un noyau.

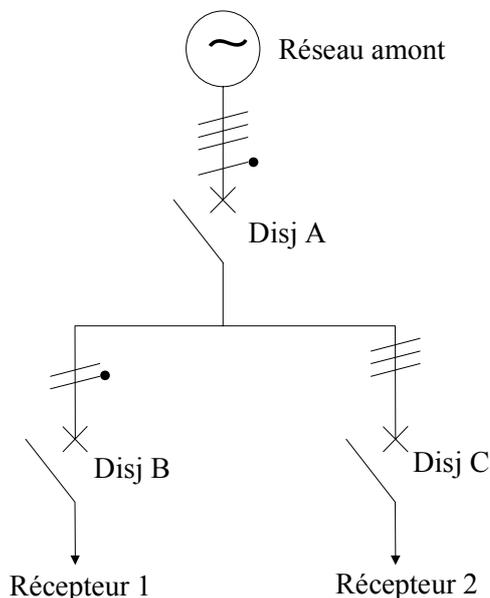
- les déclencheurs « électroniques » dont l'intérêt est d'obtenir :
  - une plus grande précision des seuils de déclenchement (courbes de déclenchement réglables selon l'utilisation).



: coupe d'un disjoncteur BT industriel 400 A.

- des possibilités d'information locale ou à distance.

- ◆ Le disjoncteur dispose de chambres de coupure dont le rôle est de maintenir la tension d'arc à une valeur convenable (voir cours sur l'arc électrique).
- ◆ Caractéristiques d'un disjoncteur : un disjoncteur est caractérisé essentiellement par son intensité nominale, sa tension nominale, son nombre de pôles, son pouvoir de coupure, le type de déclencheur utilisé et sa courbe de déclenchement.
- ◆ Exemple de schéma unifilaire d'une installation protégée par disjoncteurs



\* Disj A : Disjoncteur tétrapolaire (3 phases + neutre) ; calibre fonction de l'intensité nominale du réseau amont.

\* Disj. B : Disjoncteur bipolaire (phase + neutre) ; calibre fonction de l'intensité nominale du récepteur 1.

\* Disj. C : Disjoncteur tripolaire (3 phases) ; calibre fonction de l'intensité nominale du récepteur 2.

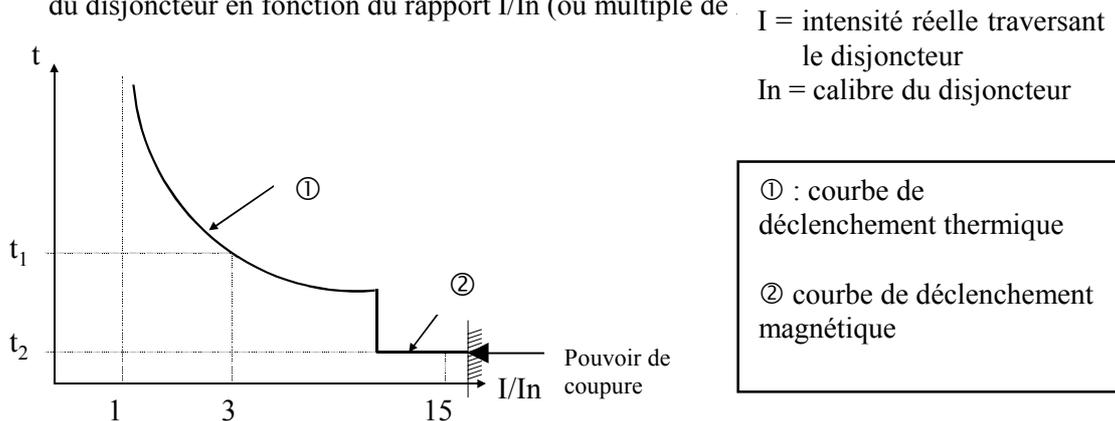
\* La tension nominale de chaque disjoncteur correspond à la tension entre 2 phases du réseau amont.

\* La courbe de déclenchement d'un disjoncteur est fonction de la nature de la charge vue en aval de celui-ci.

\* Le pouvoir de coupure d'un disjoncteur doit être supérieur à l'intensité le traversant lors d'un court circuit apparaissant à ses bornes.

## 1.2 Types, domaines d'applications, courbes de déclenchement

- ◆ **Rappel** : la principale fonction d'un disjoncteur est d'assurer la protection des circuits qu'il alimente. La protection des circuits doit être assurée contre :
  - les surcharges (déclencheur thermique à bilame)
  - les courts-circuits (déclencheur magnétique instantané ou à retard).
- ◆ **Courbe typique de déclenchement** : elle représente la variation du temps de déclenchement du disjoncteur en fonction du rapport  $I/I_n$  (ou multiple de  $I_n$ )



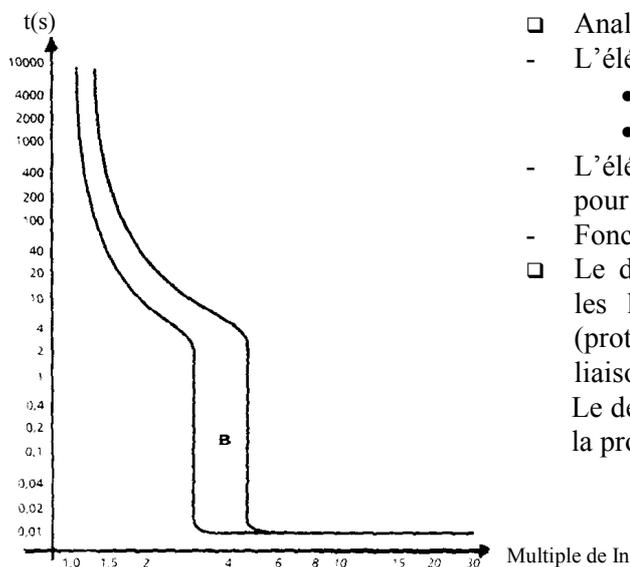
Un courant supérieur à  $I_n$  ( $I/I_n > 1$ ) entraîne le déclenchement du disjoncteur.

### Exemples :

- $I/I_n = 3$  : la protection est assurée par le déclencheur thermique (temps de déclenchement =  $t_1$ )
- $I/I_n = 15$  : la protection est assurée par le déclencheur magnétique (temps de déclenchement =  $t_2$ )

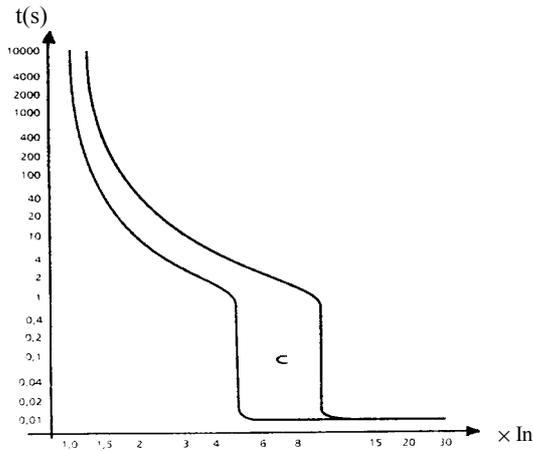
- ◆ Selon le domaine d'application du disjoncteur (sur charge résistive, sur charge inductive, déclenchement instantané ou à retard désiré), il existe différentes courbes de déclenchement. Parmi les plus employées, nous retiendrons la courbe B, la courbe C et la courbe D.

### Courbe B



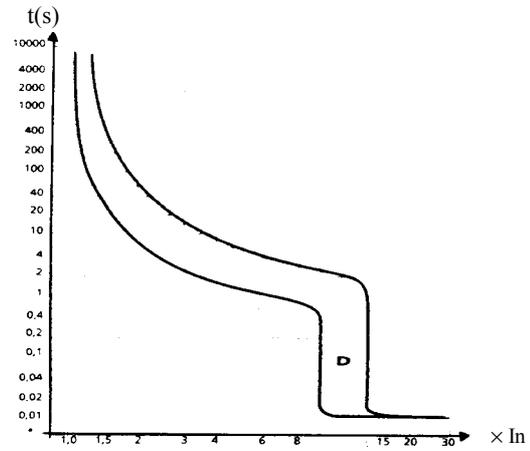
- Analyse de la courbe
  - L'élément thermique tolère :
    - $1,5 \times I_n$  durant 3 mn
    - $2 \times I_n$  durant 30 s
  - L'élément magnétique provoque la coupure pour  $8 I_n$  au bout de 10 ms
  - Fonctionnement du magnétique : 3 à 5 fois  $I_n$
- Le déclencheur courbe B est utilisé lorsque les longueurs des câbles sont importantes (protection des personnes avec schémas de liaisons à la terre type IT ou TN).  
Le déclencheur courbe B est aussi utilisé pour la protection des circuits résistifs.

### Courbe C



- protection des circuits à fort appel de courant
- fonctionnement du magnétique : 5 à 10 fois  $I_n$

### Courbe D



- protection des circuits à fort appel de courant
- fonctionnement du magnétique : 10 à 14 fois  $I_n$

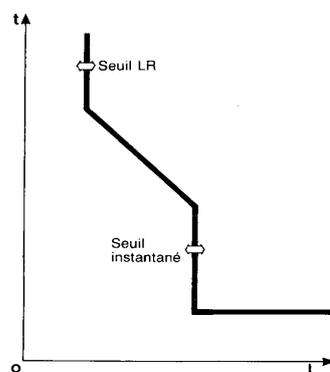
**Courbe MA** : déclenchement à 12 fois  $I_n$  sans dispositif thermique, le déclenchement est uniquement magnétique (protection des démarreurs des moteurs).

◆ L'introduction de l'électronique dans les disjoncteurs permet de réaliser la protection et la surveillance des réseaux B.T.

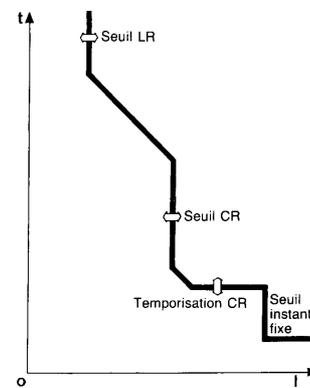
Les unités de contrôle associées aux disjoncteurs réalisent les niveaux de protection suivants :

- long retard LR (protection contre les surcharges).  
 $I_r$  (réglage du seuil de déclenchement du thermique) réglable de 0,4 à 1 fois  $I$  nominale du disjoncteur.
- Court retard CR (protection contre les courts-circuits).  
 $I_m$  (réglage du seuil de déclenchement du magnétique) réglable de 2,5 à 15 fois  $I_r$  selon le type de déclencheur.
- Instantané : fixe ou réglable.

### Courbes types de déclencheurs électronique



Courbe type 1



Courbe type 2

Courbe type 1 : - protection contre les surcharges par déclenchement long retard (LR) réglable.  
 - déclenchement instantané (seuil réglable) en cas de court circuit.

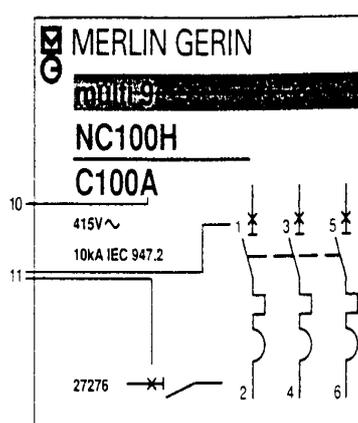
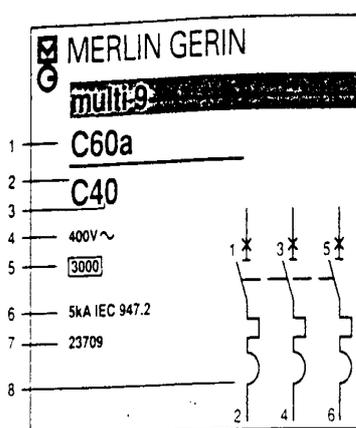
Courbe type 2 : - protection contre les surcharges par déclenchement long retard (LR) réglable.  
 - en cas de court circuit : déclenchement court retard (CR) réglable avec sélectivité chronométrique, déclenchement instantané à haut seuil fixe.

NOTA : pour ces types de disjoncteurs, la variation du temps  $t$  de déclenchement est donnée en fonction du rapport  $I/I_r$ .

### 1.3 Présentation de disjoncteurs

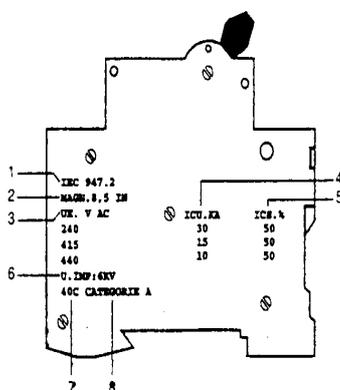
#### ◆ Disjoncteurs « magnéto-thermique »

En basse tension, les constructeurs les plus représentatifs sur le marché français sont : Legrand, Hager et Merlin-Gérin.



#### Marquage de la face avant

- 1 : variante du disjoncteur suivant le pouvoir de coupure
- 2 : courbe de déclenchement
- 3 : calibre du disjoncteur (courant assigné)
- 4 : tension d'emploi ( $U_e$ )
- 5 : pouvoir de coupure suivant la norme "domestique et analogue" NF C 61-410
- 6 : pouvoir de coupure suivant la norme "industrielle" NF C 63-120
- 7 : référence commerciale
- 8 : symbole électrique suivant le nombre de pôles
- 9 : classe de limitation
- 10 : A = Ampère ; doit être précisé suivant la norme CEI 947-2 pour applications industrielles
- 11 : symbole d'aptitude au sectionnement à coupure pleinement apparente
- 12 : marque de conformité NF USE.



#### Marquage latéral

- 1 : norme de construction (applications industrielles)
- 2 : réglage magnétique (courbe C)
- 3 : tension d'emploi ( $U_e$ )
- 4 : pouvoir de coupure ultime ( $I_{cu}$ )
- 5 : performance de coupure en service ( $I_{cs}$ ) (en %)
- 6 : tension de tenue au choc
- 7 : température de référence
- 8 : catégorie de l'appareil (A : appareil non prévu pour réaliser de la sélectivité chronométrique).

◆ Disjoncteurs avec déclencheur électronique : disjoncteurs Masterpact M08-M10

caractéristiques électriques <sup>(1)</sup>				M08				M10			
courant assigné (A) <sup>(2)</sup>		In	à 40° C	800				1 000			
tension assignée d'emploi (V)		Ue	50/60 Hz	690 (1 000 V)*				690 (1 000 V)* v)*			
tension assignée d'isolement (V)		Ui		1 000				1 000			
nombre de pôles				3,4				3,4			
calibre du 4e pôle (A)				800				1 000			
4 <sup>e</sup> type de disjoncteur											
pouvoir de coupure											
pouvoir de coupure ultime CA 50/60 Hz (kA eff.) <sup>(3)</sup>	Icu	CEI 947-2 cycle O-FO	220/415 V	40	65	100	130	40	65	100	130
			440 V	40	65	100	110	40	65	100	110
			500/690 V 1 000 V	40	65	85	85	40	65	85	85
pouvoir assigné de coupure de service CA 50/60 Hz (kA eff.) <sup>(3)</sup>	Ics	CEI 947-2 cycle O-FO-FO	220/415 V	40	65	100	130	40	65	100	130
			440 V	40	65	100	110	40	65	100	110
			500/690 V 1 000 V	40	65	85	85	40	65	85	85
courant assigné de courte durée admissible CA 50/60 Hz (kA eff.) <sup>(7)</sup>	Icw	CEI 947-2	0,5 s	40	65/45	65	12	40	65/45	65	12
			1 s	30	50/45	50	12	30	50/45	50	12
			3 s	22	32/32	32	12	22	32/32	32	12
pouvoir assigné de fermeture CA 50/60 Hz (kA crête)	Icm	CEI 947-2	220/415 V	84	143	220	286	84	143	220	286
			440 V	84	143	220	242	84	143	220	242
			500/690 V	84	143	187	143	84	143	187	143
			1 000 V		143				143		
pouvoir de coupure (kA)	Nema cycle O-FO	480 V	40	65	100	100	40	65	100	100	
			600 V	40	65	85	85	40	65	85	85
tension de tenue aux chocs (V)	Uimp		8 000				8 000				
tendue électrodynamique		(kA crête)	84	143	143	124	84	143	143	124	
aptitude au sectionnement		CEI 947-2	■				■				
temps de coupure		total maxi.	25 à 30 ms sans retard intentionnel - 9 ms pour type L1								
temps de fermeture			70 ms								
<b>protection</b>				200 à 800				200 à 1 000			
calibre In des capteurs (A) (voir en bas de page)											
unités de contrôle		instantanée	STR 18 M	■	■	■		■	■	■	■
pour protection		distribution	STR 28 D	■	■	■		■	■	■	■
		sélective	STR 38 S	■	■	■	■	■	■	■	■
		universelle	STR 58 U	■	■	■	■	■	■	■	■
			STR 68 U <sup>(4)</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■
<b>interrupteur (disjoncteur sans protection)</b>		type	NI	HI	HF		NI	HI	HF	HF	
		boîtier cache	STR 08	■	■		■	■			
		déclencheur	STR 18 I			■			■	■	
pouvoir assigné de fermeture CA 50/60 Hz (kA crête)		220 V	84	105	143		84	105	143	143	
		500/690 V	84	105	143		84	105	143	143	

Choix des capteurs

Le tableau ci-dessous indique :  
 ■ la totalité des calibres In des capteurs disponibles.  
 ■ les limites du réglage du seuil long retard Ir.

In (A)	200	250	320	400	500	600	630	800	1 000	1 200	1 250	1 600	2 000	2 500
égl. du	80	100	125	160	200	240	250	320	400	480	500	640	800	1 000
seuil Ir (A)	à 200	à 250	à 320	à 400	à 500	à 600	à 630	à 800	à 1 000	à 1 200	à 1 250	à 1 600	à 2 000	à 2 500

Unité de contrôle : STR 28 D

**Protection**

**Légende :**

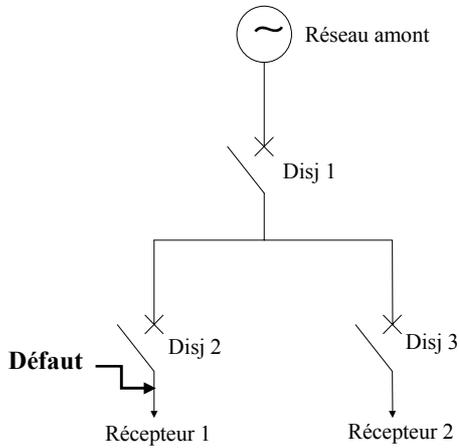
- 1 Voyant-poussoir : signalisation de déclenchement sur défaut, n'autorise la fermeture du disjoncteur qu'après réarmement
- 2 Ampèremètre à affichage numérique
- 3 Indicateur du taux de charge (% Ir)
- 4 Calibre maximum de la protection
- 5-6 Seuil de déclenchement long retard courant de réglage :  $l_0 \times I_r \times I_n$
- 7 Seuil de déclenchement instantané.
- 8 Témoin lumineux de surcharge
- 9 Emplacement pour inscription des valeurs de réglage
- 10 Prise test
- 11 Fixation de la plaque de plombage.

**Autres fonctions :**

- signalisation de défaut
- signalisation de pré-déclenchement en surcharge
- ampèremètre
- auto-surveillance (température interne).

## 1.4 Sélectivité entre disjoncteurs

### ◆ Définition de la sélectivité



Dans une installation électrique, la continuité de service est une nécessité (exemple : impératifs de production).

Un défaut survenant en un point quelconque de l'installation doit être éliminé par le disjoncteur placé immédiatement en amont du défaut.

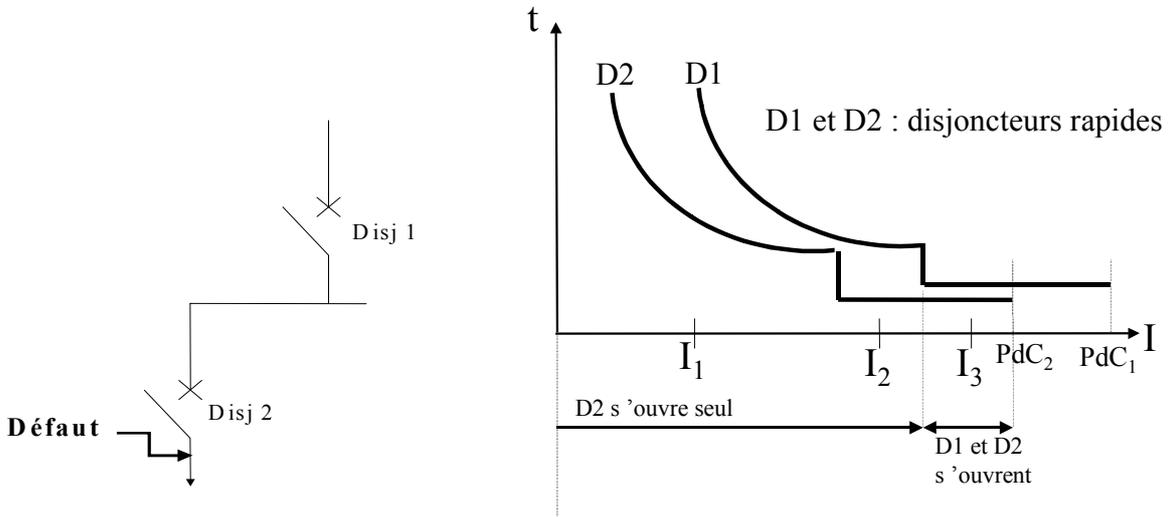
Exemple : un défaut en aval de Disj 2 doit se traduire uniquement par l'ouverture de Disj 2.

La sélectivité est totale si Disj 2 s'ouvre et si Disj 1 reste fermé.

La sélectivité est partielle si la condition notée ci-dessus n'est pas toujours respectée.

La sélectivité peut être : - **ampéremétrique**  
- **chronométrique.**

### ◆ Sélectivité ampéremétrique

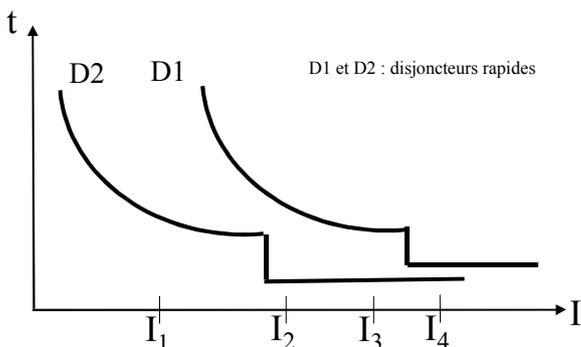


$PdC_1$  : pouvoir de coupure du disjoncteur D1  
 $PdC_2$  : pouvoir de coupure de disjoncteur D2

$I_{\text{défaut}} = I_1$  : seul D2 s'ouvre  
 $I_{\text{défaut}} = I_2$  : seul D2 s'ouvre  
 $I_{\text{défaut}} = I_3$  : D1 et D2 s'ouvrent

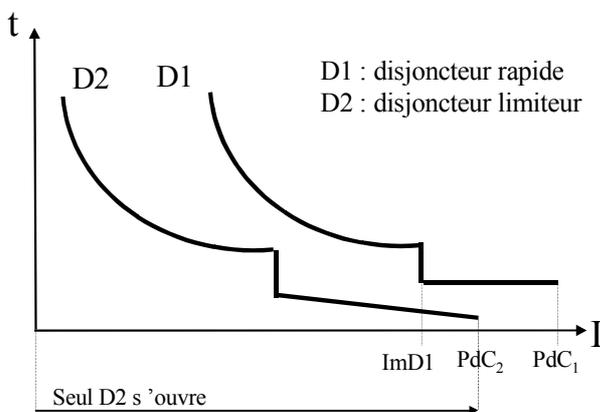
**la sélectivité est partielle**

La sélectivité ampéremétrique est d'autant plus grande que l'écart entre les calibres des disjoncteurs D1 et D2 est important.



I défaut = I<sub>1</sub> ou I<sub>2</sub> ou I<sub>3</sub> : seul D2 s'ouvre.

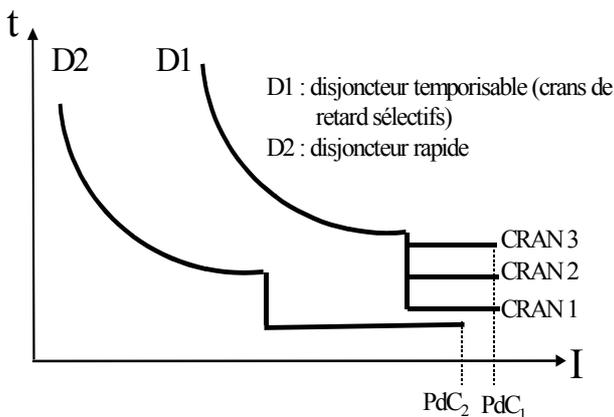
I défaut = I<sub>4</sub> : D1 et D2 s'ouvrent, la sélectivité est toujours partielle.



La sélectivité ampéremétrique est améliorée par l'utilisation d'un disjoncteur D2 limiteur. Pour des courants supérieurs au réglage du magnétique du disjoncteur D1 (ImD1) mais inférieurs à PdC<sub>2</sub>, D1 ne déclenche pas.

L'énergie limitée par la coupure de D2 reste inférieure à l'énergie nécessaire au déclenchement de D1.

◆ Sélectivité chronométrique

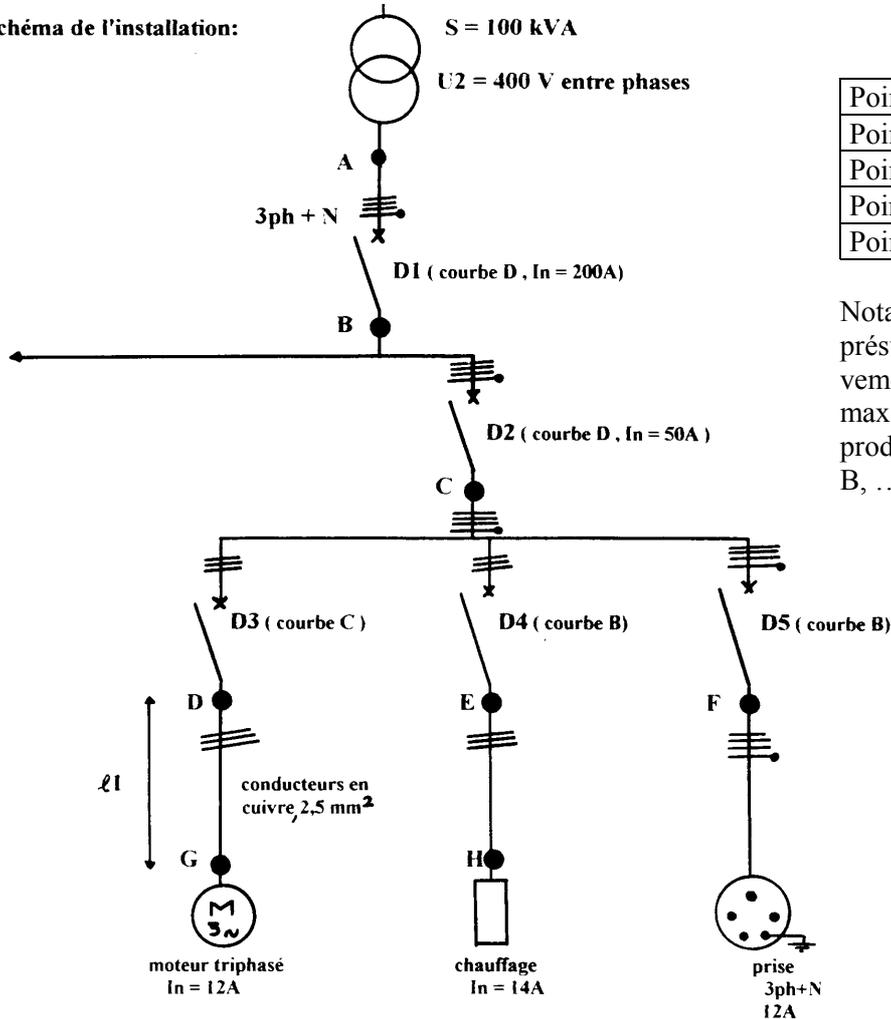


Elle s'obtient par un échelonnement des temps de déclenchement des disjoncteurs équipés de déclencheurs court retard.

Le temps de déclenchement du disjoncteur amont est retardé par rapport à celui du disjoncteur aval.

◆ Sélectivité ampéremétrique : exercice d'application

Schéma de l'installation:



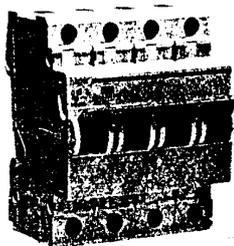
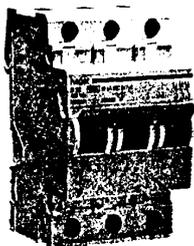
	Icc présumé
Point A	3,14 kA
Point B	2,1 kA
Point C	1,4 kA
Points D, E, F	1 kA
Point G	0,6 kA

Nota : les différentes valeurs Icc présumé représentent respectivement la valeur du courant maxi si un court-circuit se produit aux différents points A, B, ...

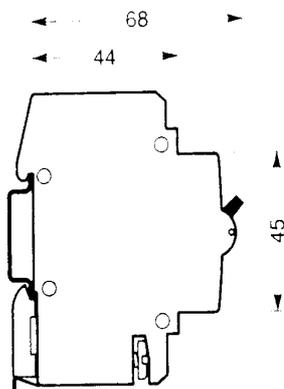
Travail demandé :

- 1) **1-a** : Pour chaque disjoncteur ( **D2** , **D3** , **D4** et **D5** ) déterminer son calibre , son nombre de pôles sa référence commerciale et son pouvoir de coupure .  
**1-b** : Le pouvoir de coupure de chaque disjoncteur est-il bien adapté en fonction des données ?
- 2) En cas de court-circuit au point **C** , que peut-on dire de la sélectivité entre les disjoncteurs **D1** et **D2** ? Justifier votre réponse .
- 3) En cas de court-circuit au point **G** , que peut -on dire de la sélectivité entre les disjoncteurs **D2** et **D3** ? Justifier votre réponse .
- 4) Dans le cas d'une mauvaise sélectivité entre les disjoncteurs **D2** et **D3** , quelle est la longueur minimale  $\ell_1$  du cable reliant le disjoncteur **D3** au moteur , permettant d'obtenir une sélectivité verticale de type ampéremétrique entre les disjoncteurs concernés ?

**B - C 6000 A**  
NFC 61-410  
(EN 60-898)  
**10 000 A**  
IEC 947-2



designation	In / A	larg. en mm 17.5 mm	emball.	ref. c.iale courbe B	n° identif.	ref. c.iale courbe C	n° identif.
disjoncteurs * tripolaires 3 P.P.	0,5 A	3	4	-	-	NF 300	466300
	1 A	3	4	-	-	NF 301	466301
	2 A	3	4	-	-	NF 302	466302
	3 A	3	4	-	-	NF 303	466303
	4 A	3	4	-	-	NF 304	466304
	6 A	3	4	NE 306	465306	NF 306	466306
	10 A	3	4	NE 310	465310	NF 310	466310
	16 A	3	4	NE 316	465316	NF 316	466316
	20 A	3	4	NE 320	465320	NF 320	466320
25 A	3	4	NE 325	465325	NF 325	466325	
32 A	3	4	NE 332	465332	NF 332	466332	
disjoncteurs * tétrapolaires 4 P.P.	0,5 A	4	3	-	-	NF 400	466400
	1 A	4	3	-	-	NF 401	466401
	2 A	4	3	-	-	NF 402	466402
	3 A	4	3	-	-	NF 403	466403
	4 A	4	3	-	-	NF 404	466404
	6 A	4	3	NE 406	465406	NF 406	466406
	10 A	4	3	NE 410	465410	NF 410	466410
	16 A	4	3	NE 416	465416	NF 416	466416
	20 A	4	3	NE 420	465420	NF 420	466420
25 A	4	3	NE 425	465425	NF 425	466425	
32 A	4	3	NE 432	465432	NF 432	466432	



disjoncteurs magneto-thermiques

**courbe "D" de 0,5 à 63 A**

ces disjoncteurs sont destinés à la protection des circuits contre les surcharges et les courts-circuits dans les locaux tertiaires :

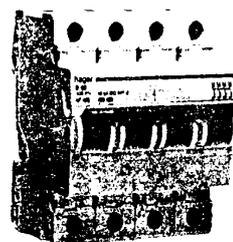
la courbe D est particulièrement adaptée à la commande de circuits et à la protection de lignes des installations soumises à des courants d'appel importants :

**mise en œuvre :**

- le cliquet bistable : 2 positions
- facilite le montage ou le démontage du disjoncteur du rail...
- pontage aisé
- en amont par des barres de pontage à languettes,
- en aval le disjoncteur est équipé de bornes b-connectées, permettant le pontage sous la tête de la vis par barres de pontage à fourches et l'alimentation par la borne à cage.

NG

**D 10 000 A**  
IEC 947-2



NG 463

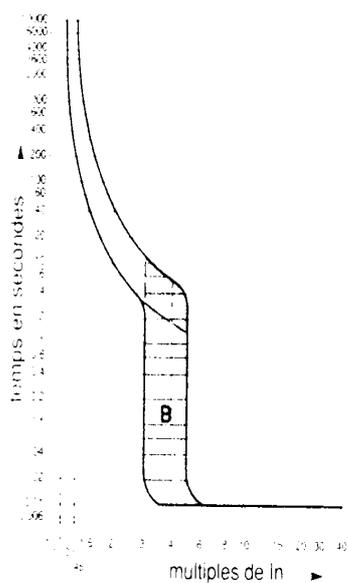
designation	In / A	larg. en mm 17.5 mm	emball.	ref. c.iale courbe B	n° identif.	ref. c.iale courbe C	n° identif.
disjoncteurs * tétrapolaires 4 P.P.	0,5 A	4	3	-	-	NG 400	467400
	1 A	4	3	-	-	NG 401	467401
	2 A	4	3	-	-	NG 402	467402
	3 A	4	3	-	-	NG 403	467403
	4 A	4	3	-	-	NG 404	467404
	6 A	4	3	NE 406	465406	NG 406	467406
	10 A	4	3	NE 410	465410	NG 410	467410
	16 A	4	3	NE 416	465416	NG 416	467416
	20 A	4	3	NE 420	465420	NG 420	467420
	25 A	4	3	NE 425	465425	NG 425	467425
	32 A	4	3	NE 432	465432	NG 432	467432
40 A	4	3	NE 440	465440	NG 440	467440	
50 A	4	3	NE 450	465450	NG 450	467450	
63 A	4	3	NE 463	465463	NG 463	467463	

### disjoncteurs multipolaires

caractéristiques électriques	référence					
	NE	NF	NG	NK	NR	NM
tension assignée (50 Hz)	230/400 V	230/400 V	230/400 V	400 V	400 V	400 V
courant assigné	6 à 63 A	0,5 à 63 A	0,5 à 63 A	0,5 à 63 A	6 à 63 A	80, 100 A
courbes de déclench. à 30° C B : 3 à 5 I <sub>n</sub> C : 5 à 10 I <sub>n</sub> D : 10 à 20 I <sub>n</sub>	B	C	D	C	C	C
pouvoir de coupure selon NFC 61-410	6 kA	6 kA	—	10 kA	—	—
pouvoir de coupure selon IEC 947-2	10 kA	10 kA	10 kA	15 kA	25 kA 6 à 20 A 20 kA 25 à 40A 15 kA 50, 63 A	10 kA
tension d'isolement	500 V					
tension diélectrique	2500 V					
endurance électrique	0,5 à 32 A 20 000 cycles 40 à 63 A 10 000 cycles					
homologation NFC 61-410 (EN 60-898)	USE  de 6 à 40 A		USE  de 6 à 40 A			

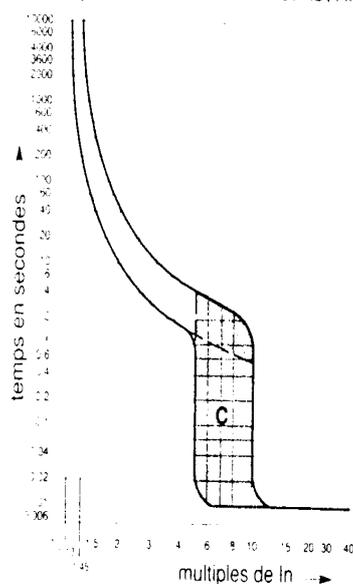
#### courbe "B" NFC 61-410 (EN 60-898)

disjoncteurs : NE calibres 6 à 63 A  
MH calibres 6 à 32 A



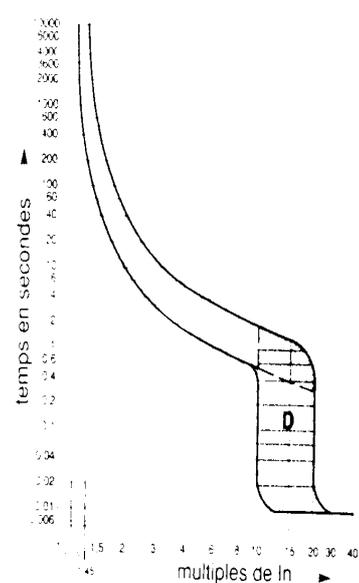
#### courbe "C" NFC 61-410 (EN 60-898)

disjoncteurs : NM calibres 80 et 100 A  
MF, MJ, ML calibres 2 à 32 A  
NF, NK, NR calibres 0,5 à 63 A  
disjoncteurs différentiels : AC, AD, AF



#### courbe "D"

disjoncteurs : NG calibres 0,5 à 63 A



courants de court-circuit à l'extrémité d'une canalisation d'après les tableaux C 3, guide C 15-105

CA	section des conducteurs de phase (mm <sup>2</sup> )		longueur de la canalisation (en mètres)																																																					
	cuivre																																																							
230 V 400 V	1.5																																			0.8	1	1.3	1.6	3	6.5	8	9.5	13	16	32										
	2.5																																			1	1.3	1.6	2.1	2.6	5	10	13	16	21	26	50									
	4																																			0.8	1.7	2.1	2.5	3.5	4	8.5	17	21	25	34	42	85								
	6																																			1.3	2.5	3	4	5	6.5	13	25	32	38	50	65	130								
	10																																			0.8	1.1	2.1	4	5.5	6.5	8.5	11	21	42	55	65	85	110	210						
	16																																				0.9	1	1.4	1.7	3.5	7	8.5	10	14	17	34	70	85	100	140	170	340			
	25																																				1	1.3	1.6	2.1	2.6	5	10	13	18	21	26	50	100	130	160	210	260			
	35																																					1.5	1.9	2.2	3	3.5	7.5	15	19	22	30	37	75	150	190	220	300	370		
	50																																					1.1	2.1	2.7	3	4	5.5	11	21	27	32	40	55	110	210	270	320			
	70																																					1.5	3	3.5	4.5	6	7.5	15	30	37	44	60	75	150	300	370				
	95																																					0.9	1	2	4	5	6	8	10	20	40	50	60	80	100	200	400			
	120																																					0.9	1	1.1	1.3	2.5	5	6.5	7.5	10	13	25	50	65	75	100	130	250		
	150																																						0.8	1	1.1	1.2	1.4	2.7	5.5	7	8	11	14	27	55	70	80	110	140	270
	185																																						1	1.1	1.3	1.5	1.6	3	6.5	8	9.5	13	16	32	65	80	95	130	160	320
	240																																						1.2	1.4	1.6	1.8	2	4	8	10	12	16	20	40	80	100	120	160	200	400
	300																																						1.5	1.7	1.9	2.2	2.4	5	9.5	12	15	19	24	49	95	120	150	190	240	
	2 x 120																																						1.5	1.8	2	2.3	2.5	5.1	10	13	15	20	25	50	100	130	150	200	250	
	2 x 150																																						1.7	1.9	2.2	2.5	2.8	5.5	11	14	17	22	28	55	110	140	180	220	280	
	2 x 185																																						2	2.3	2.6	2.9	3.5	6.5	13	16	20	26	33	65	130	160	200	260	330	
	3 x 120																																						2.3	2.7	3	3.5	4	7.5	15	19	23	30	38	75	150	190	230	300	380	
3 x 150																																						2.5	2.9	3.5	3.5	4	8	16	21	25	33	41	80	160	210	250	330	410		
3 x 185																																						2.9	3.5	4	4.5	5	9.5	20	24	29	39	49	95	190	240	290	390			
				courant de court-circuit au niveau considéré (Icc aval en kA)																																																				
Icc amont en kA	100	94	94	93	92	91	83	71	67	63	56	50	33	20	17	14	11	9	5	2.4	2	1.6	1.2	1	0.5	94	85	85	84	83	83	76	66	62	58	52	47	32	20	16	14	11	9	4.5	2.4	2	1.6	1.2	1	0.5						
	90	85	85	84	83	83	76	66	62	58	52	47	32	20	16	14	11	9	4.5	2.4	2	1.6	1.2	1	0.5	85	76	76	75	75	74	69	61	57	54	49	44	31	19	16	14	11	9	4.5	2.4	2	1.6	1.2	1	0.5						
	80	76	76	75	75	74	69	61	57	54	49	44	31	19	16	14	11	9	4.5	2.4	2	1.6	1.2	1	0.5	76	67	67	66	66	65	61	55	52	49	45	41	29	18	16	14	11	9	4.5	2.4	1.9	1.6	1.2	1	0.5						
	70	67	67	66	66	65	61	55	52	49	45	41	29	18	16	14	11	9	4.5	2.4	1.9	1.6	1.2	1	0.5	67	58	58	57	57	57	54	48	46	44	41	38	27	18	15	13	10	8.5	4.5	2.4	1.9	1.6	1.2	1	0.5						
	60	58	58	57	57	57	54	48	46	44	41	38	27	18	15	13	10	8.5	4.5	2.4	1.9	1.6	1.2	1	0.5	58	49	48	48	48	48	46	42	40	39	36	33	25	17	14	13	10	8.5	4.5	2.4	1.9	1.6	1.2	1	0.5						
	50	49	48	48	48	48	46	42	40	39	36	33	25	17	14	13	10	8.5	4.5	2.4	1.9	1.6	1.2	1	0.5	49	39	39	39	39	39	37	35	33	32	30	29	22	15	13	12	9.5	8	4.5	2.4	1.9	1.6	1.2	1	0.5						
	40	39	39	39	39	39	37	35	33	32	30	29	22	15	13	12	9.5	8	4.5	2.4	1.9	1.6	1.2	1	0.5	39	34	34	34	34	34	33	31	30	29	27	26	21	15	13	11	9	8	4.5	2.3	1.9	1.6	1.2	1	0.5						
	35	34	34	34	34	34	33	31	30	29	27	26	21	15	13	11	9	8	4.5	2.3	1.9	1.6	1.2	1	0.5	34	30	29	29	29	29	28	27	26	25	24	23	19	14	12	11	9	7.5	4.5	2.3	1.9	1.6	1.2	1	0.5						
	30	30	29	29	29	29	28	27	26	25	24	23	19	14	12	11	9	7.5	4.5	2.3	1.9	1.6	1.2	1	0.5	30	25	25	25	24	24	24	23	22	22	21	20	17	13	11	10	8.5	7	4	2.3	1.9	1.6	1.2	1	0.5						
	25	25	25	25	24	24	24	23	22	22	21	20	17	13	11	10	8.5	7	4	2.3	1.9	1.6	1.2	1	0.5	25	20	20	20	20	20	19	19	18	18	17	17	14	11	10	9	7.5	6.5	4	2.2	1.8	1.5	1.2	1	0.5						
	20	20	20	20	20	20	19	19	18	18	17	17	14	11	10	9	7.5	6.5	4	2.2	1.8	1.5	1.2	1	0.5	20	15	15	15	15	15	15	14	14	14	13	13	12	9.5	8.5	8	7	6	4	2.1	1.8	1.5	1.2	0.9	0.5						
	15	15	15	15	15	15	15	14	14	14	13	13	12	9.5	8.5	8	7	6	4	2.1	1.8	1.5	1.2	0.9	0.5	15	10	10	10	10	10	10	9.5	9.5	9.5	9.5	9	8.5	7	6.5	6.5	5.5	5	3.5	2	1.7	1.4	1.1	0.9	0.5						
	10	10	10	10	10	10	10	9.5	9.5	9.5	9.5	9	8.5	7	6.5	6.5	5.5	5	3.5	2	1.7	1.4	1.1	0.9	0.5	10	7	7	7	7	7	7	7	7	7	6.5	6.5	6.5	6	5.5	5	5	4.5	4	2.9	1.8	1.6	1.3	1.1	0.9	0.5					
	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	6.5	6.5	6.5	6	5.5	5	5	4.5	4	2.9	1.8	1.6	1.3	1.1	0.9	0.5	7	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4.5	4	4	4	3.5	3.5	2.5	1.7	1.4	1.3	1.1	0.8	0.5				
	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4.5	4	4	4	3.5	3.5	2.5	1.7	1.4	1.3	1.1	0.8	0.5	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3.5	3.5	3.5	3	3	2.9	2.2	1.5	1.3	1.2	1.1	0.8	0.4		
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3.5	3.5	3.5	3	3	2.9	2.2	1.5	1.3	1.2	1.1	0.8	0.4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2.9	2.9	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3	1.9									

Correction de l'exercice d'application :

1)

	Calibre	Nombre de pôles	Références	Pouvoir de coupures
D2	50 A	Tétrapolaire	NG450	PdC = 10 kA > Icc (C) (1,4kA)
D3	16 A	Tripolaire	NF316	PdC = 6kA > Icc (D) (1kA)
D4	16 A	Tripolaire	NE316	PdC = 6kA > Icc (E) (1kA)
D5	16 A	Tétrapolaire	NE416	PdC = 6kA > Icc (F) (1kA)

Le pouvoir de coupure de chaque disjoncteur est bien adapté.

2) Au point C, Icc (C) = 1,4 kA

$$\frac{I}{I_n}(D2) = \frac{1400}{50} = 28 \quad \text{Courbe D, déclenchement en 10 ms}$$

$$\frac{I}{I_n}(D1) = \frac{1400}{200} = 7 \quad \text{Courbe D, déclenchement en 0,8 s}$$

} Bonne sélectivité  
Seul D2 déclenche

3) Au point G, Icc (G) = 0,6 kA

$$\frac{I}{I_n}(D3) = \frac{600}{16} = 37,5 \quad \text{Courbe C, déclenchement en 10 ms}$$

$$\frac{I}{I_n}(D2) = \frac{600}{50} = 12 \quad \text{Courbe D, déclenchement en 10 ms}$$

} Aucune sélectivité

4) Il faut que  $\frac{I}{I_n}(D2) < 10$  pour une courbe D, déclenchement de D2 > 10 ms

$$\Rightarrow I_{cc}(G) < I_n(D2) \times 10 \Rightarrow I_{cc}(G) < 500 \text{ A}$$

Si : conducteur en cuivre, section 2,5 mm<sup>2</sup>, Icc amont au point D = 1kA  
et Icc aval désiré au point G < 0,5 kA, le tableau indique longueur du câble > 26m.

Si la longueur > 26 m,  $\frac{I}{I_n}(D2) < 10$ , seul le disjoncteur D3 déclenche en 10 ms.

## 1.5 Courbes de limitation (protection contre les courts-circuits maxi)

La protection contre les courts-circuits maxi est assurée lorsque les deux règles suivantes sont respectées :

- règle du pouvoir de coupure :  $PdC \text{ disjoncteur} \geq I_{cc}$ .  
 $PdC$  : pouvoir de coupure du dispositif de protection contre les courts-circuits.  
 $I_{cc}$  : intensité du courant de court-circuit à l'endroit où est installé le dispositif de protection.  
 Si  $I_{cc} > PdC$ , l'ouverture du disjoncteur n'est pas assurée. Cette forte intensité, non coupée, entraîne des échauffements dans les conducteurs (effets thermiques) et des forces de répulsion électrodynamique (efforts mécaniques) entre les conducteurs.
- règle du temps de coupure : le temps de coupure du dispositif ne doit pas être supérieur au temps portant la température des conducteurs à la limite admissible.

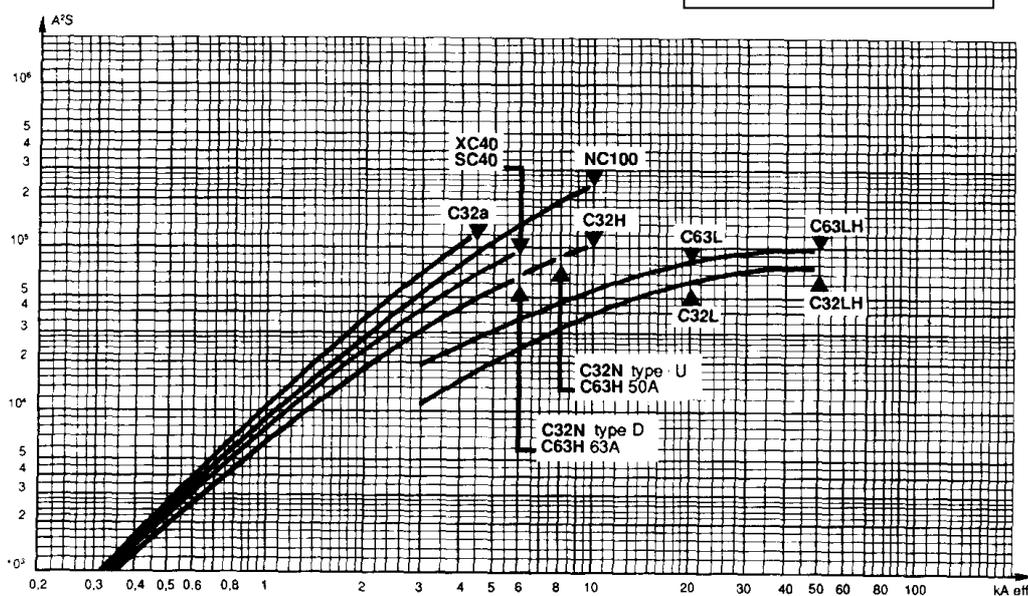
### Contraintes admissibles par les câbles :

Le tableau ci-dessous indique les contraintes thermiques admissibles par les câbles selon leur isolation, leur constitution (Cu ou Al) et leur section. Les valeurs des sections sont exprimées en  $mm^2$  et les contraintes en  $A^2s$ .

Smm <sup>2</sup>	1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	50
PVC Cu	2,97 10 <sup>4</sup>	8,26 10 <sup>4</sup>	2,12 10 <sup>5</sup>	4,76 10 <sup>5</sup>	1,32 10 <sup>6</sup>	3,4 10 <sup>6</sup>	8,26 10 <sup>6</sup>	1,62 10 <sup>7</sup>	3,31 10 <sup>7</sup>
Al					5,41 10 <sup>5</sup>	1,39 10 <sup>6</sup>	3,38 10 <sup>6</sup>	6,64 10 <sup>6</sup>	1,35 10 <sup>7</sup>
PRC Cu	4,10 10 <sup>4</sup>	1,39 10 <sup>5</sup>	2,92 10 <sup>5</sup>	6,56 10 <sup>5</sup>	1,82 10 <sup>6</sup>	4,69 10 <sup>6</sup>	1,39 10 <sup>7</sup>	2,23 10 <sup>7</sup>	4,56 10 <sup>7</sup>
Al					7,52 10 <sup>5</sup>	1,93 10 <sup>6</sup>	4,70 10 <sup>6</sup>	9,23 10 <sup>6</sup>	1,88 10 <sup>7</sup>

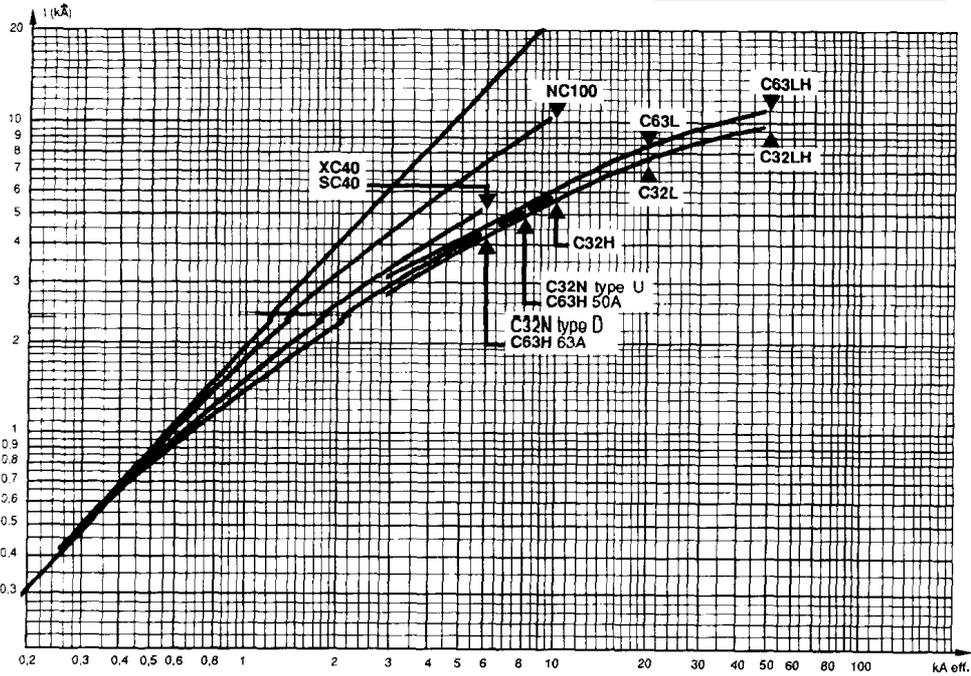
### Courbes de limitation en contrainte thermique en 380/415 V

Figure 1



**Courbes de limitation en courant en 380 / 415 V**

Figure 2



Le pouvoir de limitation d'un disjoncteur traduit sa capacité plus ou moins grande à ne laisser passer, sur court-circuit, qu'un courant inférieur au courant de défaut présumé.

Utilisation des courbes de limitation : exemples

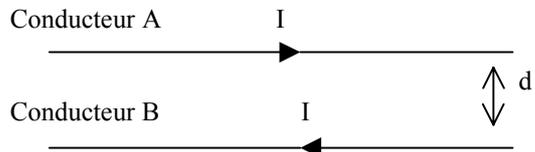
Exemple n° 1 : un câble Cu/PRC de section 2,5 mm<sup>2</sup> (contrainte admissible = 1,39 10<sup>5</sup> A<sup>2</sup>s) est protégé par un C32N de calibre 5A (figure 1)

Exemple n° 2 : un courant I<sub>cc</sub> de 20 kA eff est limité à 7,2 kA crête lorsque la protection amont est assurée par un C32L (figure 2)

Exemple n° 3 : un courant I<sub>cc</sub> de 100 kA eff est limité à 21 kA crête lorsque la protection amont est assurée par un C161L (figure 2)

Contraintes électrodynamiques :

- ◆ Considérons 2 conducteurs A et B situés à une distance notée d l'un de l'autre et parcourus par le même courant I



- ◆ Le conducteur A engendre une induction  $\beta$  à laquelle est soumise le conducteur B et réciproquement.

$$\beta = \frac{2 \times I}{10^7 \times d} \text{ (unités S.I.)}$$

- ◆ Sur le conducteur B, soumis à l'induction  $\beta$  (engendrée par le conducteur A) et traversé par le courant I s'exerce une force F. (même phénomène sur le conducteur A)

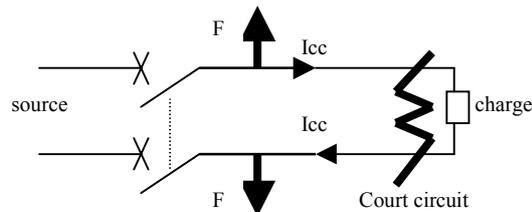
$$F = \beta \times I \times \ell \quad (\ell = \text{longueur du conducteur})$$

$$F = \frac{2 \times I^2 \times \ell}{10^7 \times d}$$

- ◆ Les forces s'exerçant sur chaque conducteur sont appelées « efforts électrodynamiques ».
- ◆ Sens des efforts : on démontre que
  - si les courants dans chaque conducteur sont de même sens, les 2 conducteurs s'attirent.
  - si les courants dans chaque conducteur sont de sens contraire, les 2 conducteurs se repoussent.



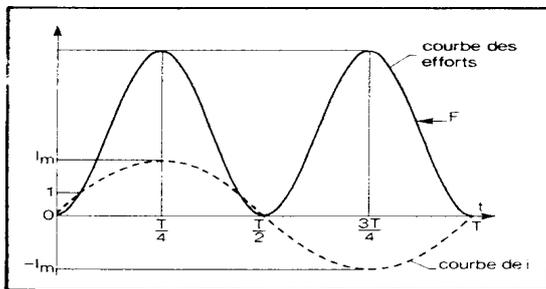
- ◆ Conséquences : lors d'un court-circuit les efforts électrodynamiques exercés sur les conducteurs peuvent être très importants.



Le choix des dispositifs de protection doit être judicieux afin de réduire la valeur du courant de défaut et sa durée.

- ◆ Si le courant de défaut est alternatif sinusoïdal  $i_{cc}(t) = I_m \times \sin \omega t$ , la force F appliquée sur chaque conducteur peut se résumer à l'expression suivante :  $F = K \times \sin^2 \omega t$ .

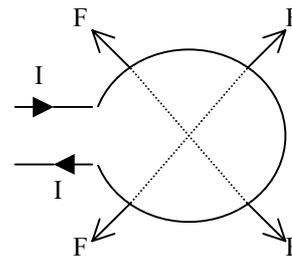
La valeur du facteur K est fonction de  $\ell$  (longueur du câble),  $d$ ,  $I_m$ , de la forme du conducteur (câble, barre, méplat), de la nature du courant (symétrique ou asymétrique).



Courbe des efforts exercés sur chaque conducteur (cas d'un court-circuit symétrique).

- ◆ Effets de boucle :

Si le conducteur se présente sous la forme d'une boucle, chaque partie élémentaire diamétralement opposée du conducteur est soumise à une force de répulsion F, la boucle tend à s'ouvrir.

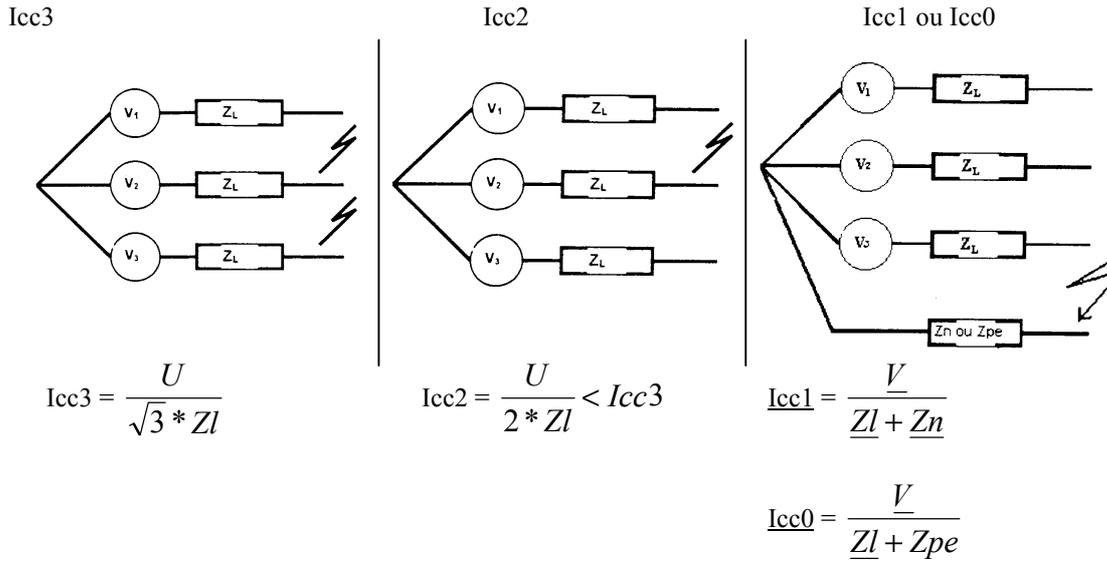


## 2. Calcul de l'intensité de court-circuit en un point d'une installation

### 2.1 Calcul du courant de court-circuit par la méthode des impédances

◆ Dans un réseau triphasé, un court-circuit peut se traduire par :

- une liaison électrique entre 3 phases (le courant de court-circuit sera appelé  $I_{cc3}$ ).
- une liaison électrique entre 2 phases ( $I_{cc2}$ )
- une liaison électrique entre 1 phase et le neutre ( $I_{cc1}$ ) ou entre 1 phase et la terre ( $I_{cc0}$ )



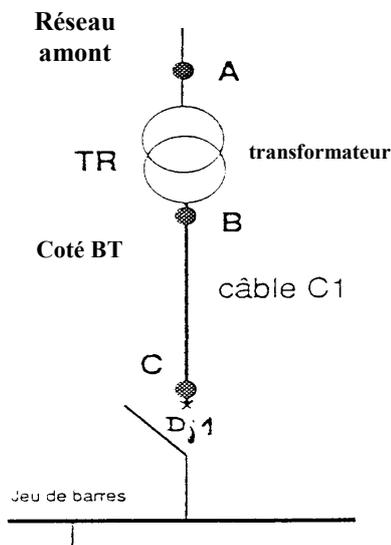
$V_1, V_2, V_3$  représentent les tensions simples du réseau côté BT.

$Zl$  représente l'impédance par phase en amont du défaut.

$Zn$  représente l'impédance du neutre.

$Zpe$  représente l'impédance du conducteur de protection équipotentielle.

- ◆ A partir des formules ci-dessus, on remarque que le courant de court-circuit, le plus néfaste pour l'installation, a lieu lors d'un court-circuit entre les 3 phases, c'est-à-dire  $I_{cc3}$  (cas uniquement envisagé dans la suite du cours).

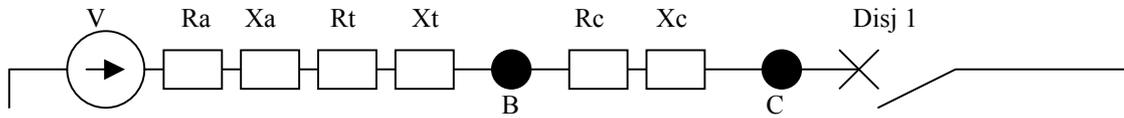


Si un court-circuit se produit côté BT :

- au point B le courant ( $I_{ccB}$ ) est limité par l'impédance interne du transformateur et celle du réseau amont ramenées au secondaire du transformateur.
- au point C, le courant ( $I_{ccC}$ ) est limité par l'impédance interne du transformateur, celle du réseau amont ramenées au secondaire du transformateur et celle du câble C1.

$I_{cc(B)} > I_{cc(C)}$

- ◆ Lors d'un court-circuit entre les 3 phases (cas le plus défavorable), l'installation peut être représentée côté BT, pour une phase, par le schéma suivant :



Ra : résistance du réseau amont ramenée au secondaire (du transformateur).

Xa : réactance du réseau amont ramenée au secondaire.

Rt : résistance totale du transformateur ramenée au secondaire.

Xt : réactance totale du transformateur ramenée au secondaire.

Rc : résistance d'une phase du câble C1.

Xc : réactance d'une phase du câble C1.

V : tension simple au secondaire.

$$I_{cc\text{eff}}(B) = \frac{V_{eff}}{Z(B)} \quad Z(B) = \sqrt{(Ra + Rt)^2 + (Xa + Xt)^2}$$

$$I_{cc\text{eff}}(C) = \frac{V_{eff}}{Z(C)} \quad Z(C) = \sqrt{(Ra + Rt + Rc)^2 + (Xa + Xt + Xc)^2}$$

Autre écriture possible (forme complexe) : 
$$\underline{I_{cc}(B)} = \frac{\underline{V}}{\underline{Z_A} + \underline{Z_t}}$$

$$\bullet^* I_{cc}(B) \neq \frac{V}{Z_A + Z_t} \quad \text{et} \quad I_{cc}(C) \neq \frac{V}{Z_A + Z_t + Z_c} \quad \text{avec} \quad Z_A = \sqrt{Ra^2 + Xa^2}$$

$$Z_t = \sqrt{Rt^2 + Xt^2}$$

$$Z_c = \sqrt{Rc^2 + Xc^2}$$

- ◆ Le pouvoir de coupure de Disj 1 doit être supérieur au courant de court-circuit susceptible de le traverser : PdC de Disj 1 > Icc(C)

- ◆ Un court-circuit au point B sera éliminé par les protections en amont du transformateur (généralement par fusibles côté réseau amont).

◆ Détermination des résistances et des réactances de l'installation :

- Le réseau amont est caractérisé par sa puissance de court-circuit  $S_{cc}$ .
- Le transformateur est caractérisé essentiellement par son couplage, ses tensions (primaire et secondaire), sa puissance apparente, sa tension de court-circuit et ses pertes cuivre.
- Le câble est caractérisé par la nature du conducteur, sa résistivité et ses dimensions géométriques

$$(R_c = \rho \times \frac{\ell}{S}) \quad \rho_{\text{cuivre}} = 22,5 \text{ m}\Omega \times \text{mm}^2/\text{m} \quad \rho_{\text{alu}} = 36 \text{ m}\Omega \times \text{mm}^2/\text{m}$$

La réactance du câble dépend de son mode de pose :

mode de pose	jeu de barres	câble triphasé	câbles unipolaires espacés	câbles unipolaires serrés en triangle	3 câbles en nappe serrée	3 câbles en nappe espacée de "d"	3 câbles en nappe espacée de "d"
schema							
reactance linéique valeurs moyenne (en mΩ/m)	0,15	0,08	0,15	0,085	0,095	0,145	0,19

◆ Formules associées

Réseau amont ramené au secondaire du transformateur.	Transformateur
$Z_a = \frac{U^2}{S_{cc}}$ $X_a = \sqrt{Z_a^2 - R_a^2}$	$R_t = \frac{P_{cu} \times U^2}{S^2 n}$ $X_t = \sqrt{Z_t^2 - R_t^2}$
$R_a = 0,15 \times Z_a$	$Z_t = \frac{U_{cc}}{100} \times \frac{U^2}{S_n}$

U = tension entre 2 phases côté secondaire du transformateur.

$S_{cc}$  = puissance de court-circuit du réseau amont.

$P_{cu}$  = pertes cuivre du transformateur.

$S_n$  = puissance apparente nominale du transformateur.

$U_{cc}$  = tension de court-circuit du transformateur (exprimée en %).

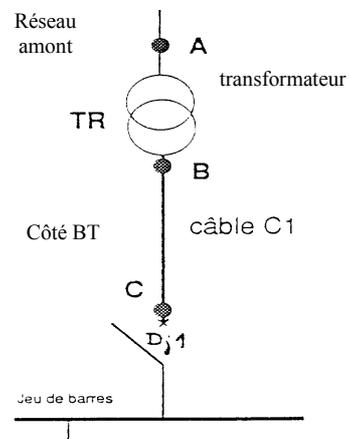
**2.2 Applications numériques**

Application numérique n° 1 : On se propose de calculer la valeur du courant lors d'un court-circuit au point B puis lors d'un court-circuit au point C de l'installation.

Caractéristiques de l'installation :

- réseau amont  $S_{cc} = 500 \text{ MVA}$
- transformateur 20 kV/410V,  $S_n = 400 \text{ kVa}$ ,  $U_{cc} = 6\%$ ,  $P_{cu} = 5 \text{ kW}$  ( $U = 410 \text{ V}$  entre 2 phases au secondaire)
- câble C1 =  $3 \times 150 \text{ mm}^2$  par phase en cuivre, longueur = 3 mètres.

Calculer par la méthode des impédances la valeur du courant de court-circuit  $I_{cc}(B)$  puis  $I_{cc}(C)$ .



Application numérique n° 2 :

Le sujet étudié concerne la restructuration de la production et de la distribution en énergie électrique d'une usine.

Le producteur distributeur national d'énergie électrique amène celle-ci au poste de distribution par l'intermédiaire d'une arrivée 20 kV, 50 Hz.

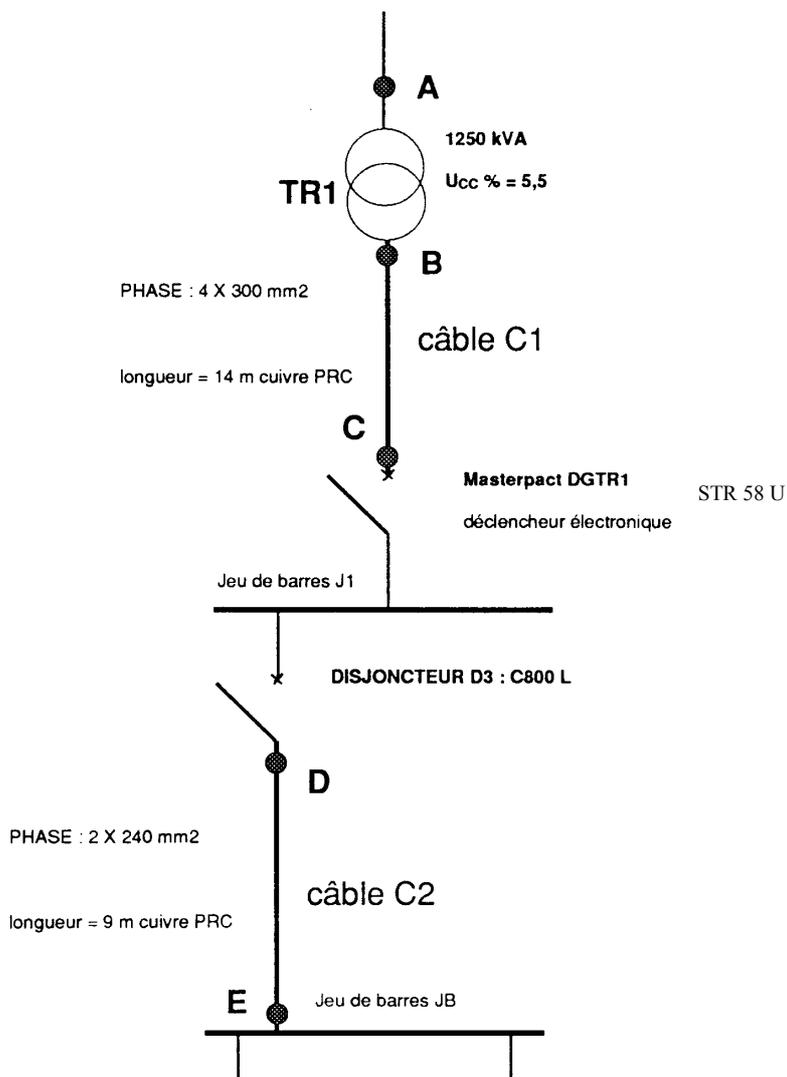
Le transformateur TR1 a comme caractéristiques :  $S_n = 1250$  kVA, 20 kV au primaire, 410 V au secondaire,  $U_{cc} \% = 5,5$ , pertes joule nominales = 15000 W.

La ligne BT reliant le transformateur TR1 au disjoncteur DGTR1 a pour caractéristiques : une phase constituée de 4 conducteurs unipolaires en cuivre de section  $300$  mm<sup>2</sup>, et de longueur 14 m.

Le disjoncteur DGTR1 est un disjoncteur Masterpact associé à un déclencheur électronique STR 58 U.

Le disjoncteur D3 est un disjoncteur standard C800N associé à un déclencheur électronique.

La ligne BT reliant le disjoncteur D3 au jeu de barres JB a pour caractéristiques : une phase constituée de deux conducteurs unipolaires en cuivre de section  $240$  mm<sup>2</sup> et de longueur 9 m.



---

Questions :

1) Déterminer la résistance et la réactance par phase.

1.1 – au point B (négliger l'impédance du réseau amont)

1.2 – du câble C1

1.3 – du câble C2

Résistivité du cuivre =  $22,5 \times 10^{-9} \Omega\text{m}$

Pour déterminer la réactance  $X$  en  $\text{m}\Omega$  des câbles, on utilisera la formule  $X = 0,08 \times L$  (avec  $L$  en m) s'il y a plusieurs conducteurs en parallèle par phase, diviser la réactance par le nombre de conducteur.

2) Déterminer la valeur des courants de courts-circuits triphasés présumés aux points B, C, D, E de l'installation (négliger la résistance et la réactance des jeux de barres).

3) 3.1 – Calculer l'intensité de service du disjoncteur DGTR1.

3.2 – Déterminer son pouvoir de coupure.

A partir des documentations fournies :

3.3 – Choisir le calibre de ce disjoncteur.

3.4 – A quelle valeur doit être réglé le seuil  $I_r$  de la protection « long retard » ?

3.5 – Quelles sont alors les valeurs minimale et maximale du seuil  $I_m$  de la protection « court retard » ?

3.6 – Pour les différents crans de temporisation, donner les temps maxi de surintensité sans déclenchement ainsi que les temps maxi de coupure.

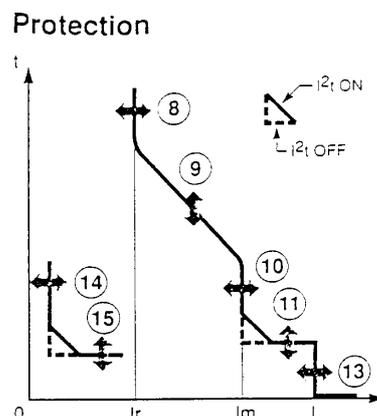


Choix de l'unité de contrôle : les disjoncteurs Masterpact M08 à M63 sont équipés d'une unité de contrôle électronique. Toutes les unités de contrôle STR sont insensibles aux harmoniques du réseau. Chaque unité de contrôle de la gamme correspond à un type d'application : distribution, instantanée, sélective, universelle.

Caractéristiques de l'unité de contrôle STR 58 U.

**Légende :**

- 8 : seuil de déclenchement long retard, courant de réglage :  $I_0 \times I_r \times I_n$ .
- 9 : temporisation long retard
- 10 : seuil de déclenchement court retard
- 11 : temporisation court retard
- 13 : seuil de déclenchement instantané
- 14 : seuil de déclenchement sur défaut terre
- 15 : temporisation sur défaut terre.



**Unités de contrôle**

types de disjoncteurs associés

**Protections de base**

**protection long retard LR**

réglage du seuil ( $I_r$ ) par commut.	$I_0 = I_n \times \dots$
$I_0$ et $I_r$ décl. entre 1,05 et 1,20 x $I_r$	$I_r = I_0 \times \dots$
temporisation ( $t_r$ )	
précision : + 0 - 20 %	$t_r$ à 1,5 $I_r$ (s)
	$t_r$ à 6 $I_r$ (s)
	$t_r$ à 7,2 $I_r$ (s)

**protection court retard CR**

réglage du seuil ( $I_m$ ) par commut. $I_m$	$I_m = I_r \times \dots$
temporisation ( $t_m$ )	cran $t_m$ avec $I^2t$ OFF
	cran $t_m$ avec $I^2t$ ON
	temps maxi de surintensité sans déclenchement (ms)
	temps maxi de coupure (ms)

**protection instantanée I**

réglage du seuil par commutateur	
plage de réglage	
précision	
position OFF en face avant	

**Fonctions de base**

**signalisation de défaut**

en cas de déclenchement sur défaut	voyant poussoir en face avant	■
	contact de signalisation à distance (SDE)	■
alarme LR	DEL (fixe à 0,9 $I_r$ , clignotante si dépassement du seuil	■
	contact de signalisation à distance de dépassement du seuil LR (en option)	■
	alimentation à propre courant	■

**auto-surveillance**

échauffement interne	■
----------------------	---

**STR 58 U**

N1, H1, H2, L1

■	0,5 à 1 (4 crans)
■	0,8 à 1 (8 crans)
■	réglable
■	15 30 60 120 240 430
■	0,94 1,88 3,75 7,50 15 30
■	0,65 1,30 2,60 5,20 10 21
■	1,5 à 10 ± 15 %
■	0 0,1 0,2 0,3 0,4
■	0,1 0,2 0,3
■	0 80 140 230 350
■	80 140 230 350 500
■	$I = I_n \times \dots$
■	$2 \times I_n$ à Max (2)
■	± 15 %
■	sur types N1 et H1

Corrigé application numérique n° 1 :

$$X_a = 0,3362 \text{ m}\Omega \quad R_a = 0,05043 \text{ m}\Omega \quad R_t = 5,25 \text{ m}\Omega \quad Z_t = 25,2 \text{ m}\Omega \quad X_t = 24,64 \text{ m}\Omega$$

$$R_c = \frac{22,5 \times 10^{-9} \times 3}{150 \times 10^{-6} \times 3} = 0,15 \text{ m}\Omega$$

$$X_c = 0,08 \times 3 = 0,24 \text{ m}\Omega$$

$$I_{cc}(B) = \frac{V}{Z(B)} = 9,39 \text{ kA}$$

$$I_{cc}(C) = \frac{V}{Z(C)} = 9,29 \text{ kA}$$

La faible différence entre  $I_{cc}(B)$  et  $I_{cc}(C)$  provient de la faible impédance du câble C1.

Corrigé application numérique n° 2 :

1.1 :  $R(B) = R$  transformateur = 1,613 m $\Omega$

$Z(B) = Z$  transformateur = 7,39 m $\Omega$

$X(B) = X$  transformateur = 7,21 m $\Omega$

1.2 :  $RC1 = \frac{22,5 \times 10^{-9} \times 14}{4 \times 300 \times 10^{-6}} = 0,2625 \text{ m}\Omega$        $XC1 = 0,08 \times 14/4 = 0,28 \text{ m}\Omega$

1.3 :  $RC2 = 0,4218 \text{ m}\Omega$        $XC2 = 0,36 \text{ m}\Omega$

2 :  $I_{cc}$  présumé =  $V/Z$        $Z(B) = 7,39 \text{ m}\Omega$

$$Z(C) = \sqrt{(1,613 + 0,2625)^2 + (7,21 + 0,28)^2} = 7,72 \text{ m}\Omega$$

$Z(D) = Z(C)$  : impédance du jeu de barres négligée.

$Z(E) = 8,17 \text{ m}\Omega$

$I_{cc}(B) = 32 \text{ kA}$

$I_{cc}(C) = I_{cc}(D) = 30 \text{ kA}$

$I_{cc}(E) = 28 \text{ kA}$

3.1 :  $I_{DGTR1} = I$  nominal au secondaire du transformateur =  $\frac{1250 \times 10^3}{410 \times \sqrt{3}} = 1760 \text{ A}$

3.2 :  $PdC$  de  $DGTR1 = I_{cc}$  présumé au point C = 30 kA

3.3 : calibre = 2000A : Masterpact M20

3.4 :  $I$  nominal disjoncteur = 2000A,  $I_r = 1760 \text{ A}$        $I_r = 0,88 \times I$  nominal disjoncteur

3.5 :  $I_m = 1,5$  à  $10 \times I_r = 2640 \text{ A}$  à  $17,6 \text{ kA}$ .

3.6 :

	Temps maxi de surintensité sans déclenchement	Temps maxi de coupure
Cran 0	0	80 ms
Cran 0,1	80 ms	140 ms
Cran 0,2	140 ms	230 ms
Cran 0,3	230 ms	350 ms
Cran 0,4	350 ms	500 ms

---

### 3. Circuits électriques : détermination de la section des conducteurs

#### 3.1 Méthodologie

L'ensemble d'un circuit électrique (conducteurs et protections associées) est déterminé de manière à satisfaire à toutes les contraintes de fonctionnement.

L'étude de l'installation consiste à déterminer précisément les canalisations et leurs protections électriques en commençant à l'origine de l'installation (source) pour aboutir aux circuits terminaux (récepteurs).

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 engendrer de chutes de tension susceptibles de nuire au fonctionnement de certains récepteurs (période de démarrage d'un moteur par exemple).

En outre, la protection (disjoncteur ou fusible) doit :

- Protéger la canalisation pour toutes les surintensités ;
- Assurer la protection des personnes contre les contacts indirects.

#### 3.2 Définitions

◆ Courant d'emploi IB :

- au niveau des circuits terminaux, c'est le courant qui correspond à la puissance apparente des récepteurs.

- au niveau des circuits de distribution, c'est le courant correspondant à la puissance d'utilisation laquelle tient compte des coefficients de simultanéité et d'utilisation.

◆ Courant admissible IZ : c'est le courant maximal que la canalisation peut véhiculer en permanence sans préjudice pour sa durée de vie. Ce courant pour une section donnée dépend de plusieurs paramètres :

- constitution du câble (cuivre, aluminium, isolation PVC ou PR, nombre de conducteurs actifs)
- température ambiante
- mode de pose
- influence des circuits voisins (effets de proximité).

◆ Surintensité : il y a surintensité chaque fois que le courant traversant un circuit est supérieur à son intensité admissible. On distingue 2 types de surintensité :

- les surcharges : surintensités se produisant dans un circuit électriquement sain (courant de démarrage d'un moteur asynchrone, surabondance momentanée des récepteurs en fonctionnement).
- les courants de court-circuit : ils sont consécutifs à un défaut dans un circuit entre plusieurs conducteurs.

### 3.3 Détermination pratique de la section minimale d'une canalisation

La section d'un conducteur de phase dépend du mode de pose et d'un coefficient d'influence noté K. Le coefficient K caractérise l'influence des différentes conditions de l'installation.

$$K = K1 \times K2 \times K3$$

Les valeurs des coefficients K1, K2, K3 sont données dans les tableaux suivants.

◆ Détermination de la lettre de sélection :

La lettre de sélection de B à F dépend du conducteur utilisé et de son mode de pose. Les modes de pose sont très nombreux. La norme NFC 15 – 100 les a groupés en méthodes de référence et ils sont désignés par une lettre de sélection.

type d'éléments conducteurs	mode de pose	lettre de sélection
conducteurs et câbles multiconducteurs	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ sous conduit, profilé ou goulotte, en apparent ou encastré</li> <li>■ sous vide de construction, faux plafond</li> <li>■ sous caniveau, moulures, plinthes, chambranles</li> </ul>	B
	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ en apparent contre mur ou plafond</li> <li>■ sur chemin de câbles ou tablettes non perforées</li> </ul>	C
câbles multiconducteurs	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ sur échelles, corbeaux, chemin de câbles perforé</li> <li>■ fixés en apparent, espacés de la paroi</li> <li>■ câbles suspendus</li> </ul>	E
câbles monoconducteurs	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ sur échelles, corbeaux, chemin de câbles perforé</li> <li>■ fixés en apparent, espacés de la paroi</li> <li>■ câbles suspendus</li> </ul>	F

◆ Facteur de correction K1 :

Le facteur K1 mesure l'influence du mode de pose.

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

◆ Facteur de correction K2 :

Le facteur K2 mesure 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	

◆ Facteur de correction K3 :

Le facteur K3 mesure l'influence de la température ambiante et dépend de la nature de l'isolant.

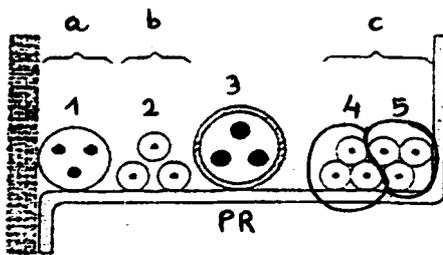
températures ambiantes (°C)	isolation		
	élastomère (caoutchouc)	polychlorure de vinyle (PVC)	polyéthylène réticulé (PR) butyle, éthylène, propylène (EPF)
10	1,29	1,22	1,15
15	1,22	1,17	1,12
20	1,15	1,12	1,08
25	1,07	1,07	1,04
30	1,00	1,00	1,00
35	0,93	0,93	0,96
40	0,82	0,87	0,91
45	0,71	0,79	0,87
50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

◆ Exemple :

Un câble PR triphasé est installé sur un chemin de câbles perforé, jointivement avec 3 autres circuits constitués :

- d'un câble triphasé (1<sup>er</sup> circuit) - a
- de 3 câbles unipolaires (2<sup>ème</sup> circuit) - b
- de 6 câbles unipolaires (3<sup>ème</sup> circuit). Ce circuit est constitué de 2 conducteurs par phase - c

Il y a donc 5 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 = 0,75, K3 = 0,91, donc K = 0,68.

◆ Détermination de la section minimale

Connaissant le courant admissible IZ (sinon choisir IB, courant d'emploi), on calcule l'intensité fictive

$$I'Z = \frac{IZ}{K}$$

Le tableau suivant permet de déterminer la section minimale en fonction de la lettre de sélection, du type de conducteur (nombre de phases et nature de l'isolant) et de l'intensité fictive : I'Z.

		isolant et nombre de conducteurs chargés (3 ou 2)							
		caoutchouc ou PVC			butyle ou PR ou éthylène PR				
lettre de sélection	B	PVC3	PVC2		PR3		PR2		
	C		PVC3		PVC2	PR3		PR2	
	E			PVC3		PVC2	PR3		PR2
	F				PVC3		PVC2	PR3	PR2
section cuivre (mm <sup>2</sup> )	1,5	15,5	17,5	19,5	19,5	22	23	24	26
	2,5	21	24	25	27	30	31	33	36
	4	28	32	34	36	40	42	45	49
	6	36	41	43	48	51	54	58	63
	10	50	57	60	63	70	75	80	86
	16	68	76	80	85	94	100	107	115
	25	89	96	101	112	119	127	138	149
	35	110	119	126	138	147	158	169	185
	50	134	144	153	168	179	192	207	225
	70	171	184	196	213	229	246	268	289
	95	207	223	238	258	278	298	328	352
	120	239	259	276	299	322	346	382	410
	150		299	319	344	371	395	441	473
	185		341	364	392	424	450	506	542
	240		403	430	461	500	538	599	641
	300		464	497	530	576	621	693	741
400					656	754	825		
500					749	868	946		
630					855	1 005	1 088		
section aluminium (mm <sup>2</sup> )	2,5	16,5	18,5	19,5	21	23	25	26	28
	4	22	25	26	28	31	33	35	38
	6	28	32	33	36	39	43	45	49
	10	39	44	46	49	54	59	62	67
	16	53	59	61	66	73	79	84	91
	25	70	73	78	83	90	98	101	108
	35	86	90	96	103	112	122	126	135
	50	104	110	117	125	136	149	154	164
	70	133	140	150	160	174	192	198	211
	95	161	170	183	195	211	235	241	257
	120	186	197	212	226	245	273	280	300
	150		227	245	261	283	316	324	346
	185		259	280	298	323	363	371	397
	240		305	330	352	382	430	439	470
	300		351	381	406	440	497	508	543
	400					526	600	663	
500					610	694	770		
630					711	808	899		

Dans l'exemple précédent,  $K = 0,68$ .

En considérant un courant admissible  $I_Z$  dans le câble PR triphasé de 25 A,  $I'Z = 25/0,68 = 36,8$  A.

En se plaçant sur la ligne correspondant à la lettre de sélection E, dans la colonne PR3, on choisit la valeur immédiatement supérieure à 36,8 A, c'est-à-dire ici, 42 A.

Dans ce cas, la section d'un conducteur de phase du câble PR sera de 4mm<sup>2</sup> pour le cuivre ou de 6mm<sup>2</sup> pour l'aluminium.

### 3.4 Détermination de la chute de tension

- ♦ La norme NFC15-100 impose que la chute de tension entre l'origine de l'installation BT et tout point d'utilisation n'excède pas les valeurs suivantes :

	Eclairage	Autres usages (forces motrices)
Alimentation par le réseau BT de distribution publique	3 %	5 %
Alimentation par poste privé HT / BT	6 %	8 %

Cette chute de tension s'entend en service normal (en dehors des appels de courant au démarrage des moteurs) et lorsque les appareils susceptibles de fonctionner simultanément sont alimentés.

Lorsque la chute de tension est supérieure à ces valeurs, il sera nécessaire d'augmenter la section de certains circuits jusqu'à ce que l'on arrive à des valeurs inférieures à ces limites.

Il est recommandé de ne pas atteindre la chute de tension maximale autorisée pour les raisons suivantes :

- Le bon fonctionnement des moteurs est garanti pour leur tension nominale (plus ou moins 5 % en régime permanent).
- La chute de tension peut être importante lors du démarrage d'un moteur (si l'intensité de démarrage est importante).
- La chute de tension est synonyme de pertes en ligne, ce qui va à l'encontre des économies d'énergie.

- ♦ Calcul de la chute de tension en ligne en régime permanent

Le tableau ci-dessous donne la chute de tension par **km** de câbles pour un courant de **1A** en fonction :

- Du type d'utilisation : force motrice avec  $\cos \varphi$  voisin de 0,8 ou éclairage avec  $\cos \varphi$  voisin de 1.
- Du type de câble monophasé ou triphasé.

La chute de tension dans un circuit s'écrit alors  $\Delta U \text{ (Volt)} = B \times IB \times L$

B est donné par le tableau ; IB : courant d'emploi en A ; L : longueur du câble en km.

Section mm <sup>2</sup>		Circuit monophasé			Circuit triphasé équilibré		
Cuivre	Aluminium	Force motrice		Eclairage	Force motrice		Eclairage
		Service normal Cosφ = 0,8	Démarrage Cosφ = 0,35	Cosφ = 1	Service normal Cosφ = 0,8	Démarrage Cosφ = 0,35	Cosφ = 1
1.5		24	10.6	30	20	9.4	25
2.5		14.4	6.4	18	12	5.7	15
4		9.1	4.1	11.2	8	3.6	9.5
6	10	6.1	2.9	7.5	5.3	2.5	6.2
10	16	3.7	1.7	4.5	3.2	1.5	3.6
16	25	2.36	1.15	2.8	2.05	1	2.4
25	35	1.5	0.75	1.8	1.3	0.65	1.5
35	50	1.15	0.6	1.29	1	0.52	1.1
50	70	0.86	0.47	0.95	0.75	0.41	0.77
70	120	0.64	0.37	0.64	0.56	0.32	0.55
95	150	0.48	0.3	0.47	0.42	0.26	0.4
120	185	0.39	0.26	0.37	0.34	0.23	0.31
150	240	0.33	0.24	0.3	0.29	0.21	0.27
185	300	0.29	0.22	0.24	0.25	0.19	0.2
240	400	0.24	0.2	0.19	0.21	0.17	0.16

300	500	0.21	0.19	0.15	0.18	0.16	0.13
-----	-----	------	------	------	------	------	------

### 3.5 Tableaux récapitulatifs

Les résultats inscrits dans les tableaux ci-dessous sont issus des formules vues au paragraphe 2.1.

- ◆ Impédance du réseau amont :

Scc	U(V)	Ra (mΩ)	Xa (mΩ)
250 MVA	237	0.033	0.222
	410	0.1	0.7
500 MVA	237	0.017	0.111
	410	0.05	0.35

Scc : puissance de court-circuit du réseau amont

U : tension entre 2 phases côté secondaire du transformateur

Ra : résistance du réseau amont ramenée au secondaire du transformateur

Xa : réactance du réseau amont ramenée au secondaire du transformateur.

- ◆ Tension de court-circuit d'un transformateur triphasé :

Puissance du transformateur en kVA	Tension de court-circuit Ucc	
	Tension au secondaire entre phases	
	237 V	410 V
50 à 630	4 %	4 %
800	5 %	4,5 %
1000	5,5 %	5 %
1250	6 %	5,5 %
1600	6,5 %	6 %
2000	7 %	6,5 %
2500	7,5 %	7 %
3150	7,5 %	7 %

- ◆ Courant nominal In et courant de court-circuit Icc d'un transformateur triphasé

$$\text{Rappel : } S = U \times I_n \times \sqrt{3} \quad I_{cc} = \frac{I_n}{U_{cc} / 100}$$

En pratique, le courant de court-circuit réel est légèrement inférieur aux valeurs calculées car la puissance du réseau amont n'est jamais infinie.

Le tableau ci-dessous donne Icc au secondaire d'un transformateur en tenant compte de l'impédance d'un réseau amont de 500 MVA de puissance de court-circuit.

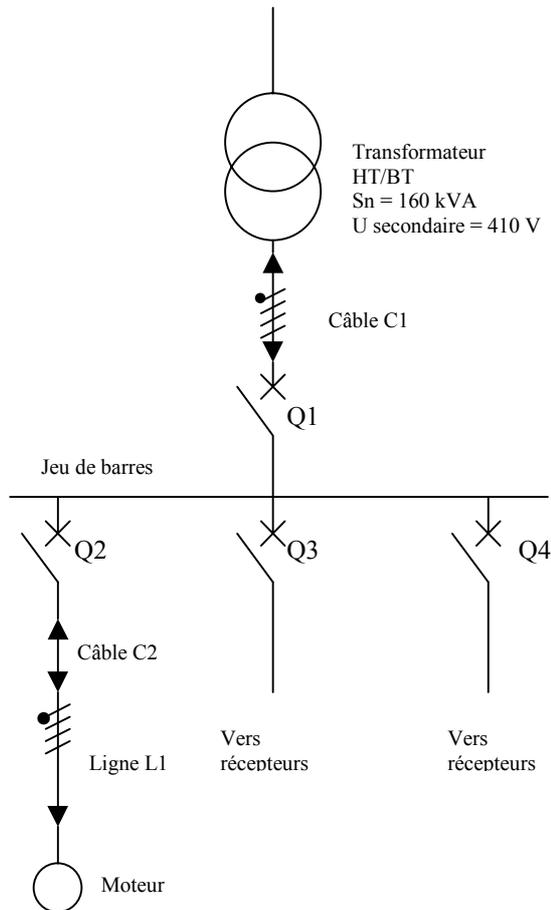
S(kVA)	15	25	40	50	63	80	100	160	250	315	400	500	530	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	
<b>U=237V</b>																					
<b>In(A)</b>	39	61	97	122	153	195	244	390	609	767	974	1218	1535	1949	2436	3045	3899	4872	6090	7673	
<b>Icc(A)</b>	973	1521	2431	3038	3825	4853	6060	9667	15038	18887	23883	29708	37197	41821	42738	48721	57151	65840	76127	94330	
<b>U=410V</b>																					
<b>In(A)</b>	23	35	56	70	89	103	141	225	352	444	563	704	887	1127	1408	1760	2253	2816	3520	4435	
<b>Icc(A)</b>	563	879	1405	1756	2210	2907	3503	5588	8692	10917	13806	17173	21501	24175	27080	30612	35650	40817	46949	58130	

◆ Impédance d'un transformateur ramenée au secondaire

Tension	U entre phases au secondaire = 237 V				U entre phases au secondaire = 410 V			
	Puissance (kVA)	Ucc %	Rtr (mΩ)	Xtr (mΩ)	Ztr (mΩ)	Ucc %	Rtr (mΩ)	Xtr (mΩ)
100	4	11,79	19,13	22,47	4	35,3	57,23	67,24
160	4	5,15	13,06	14,04	4	15,63	39,02	42,03
250	4	2,92	8,5	8,99	4	8,93	25,37	26,90
315	4	2,21	6,78	7,13	4	6,81	20,22	21,34
400	4	1,61	5,38	5,62	4	5,03	16,04	16,81
500	4	1,235	4,32	4,49	4	3,9	12,87	13,45
630	4	0,92	3,45	3,57	4	2,95	10,25	10,67
800	4,5	0,895	3,03	3,16	4,5	2,88	9	9,45
1000	5,5	0,68	3,01	3,09	5	2,24	8,10	8,405
1250					5,5	1,813	7,16	7,39
1600					6	1,389	6,14	6,3
2000					6,5	1,124	5,34	5,46

### 3.6 Exercice d'application

Distribution basse tension d'un atelier de production : On donne le schéma unifilaire de l'atelier.



- 
- ◆ Le transformateur HT/BT est un transformateur client (poste privé) et la tension entre 2 phases au secondaire est de 410 V.
  - ◆ Le choix de la nature des câbles (en cuivre) s'est porté sur le polyéthylène réticulé.
  - ◆ La température ambiante est de 40 ° C.
  - ◆ Le câble C1 est formé de 3 câbles monoconducteurs (considérés ici comme 3 circuits distincts) posés sur un chemin de câble perforé.
  - ◆ Longueur du câble C1 = 80 m, longueur du câble C2 = 55 m, longueur de la ligne L1 = 25 m.

Le travail demandé doit permettre de :

- déterminer les caractéristiques de C1, C2, L1 et du disjoncteur Q1.
- calculer les chutes de tensions en ligne en différents points de l'installation et de vérifier la compatibilité de celles-ci avec la norme en vigueur.

Question 1 :

La puissance du transformateur triphasé étant de 160 kVA, calculer la valeur du courant nominal fourni au secondaire (prendre cette valeur pour le choix des éléments suivants).

Question 2 :

Calculer le courant équivalent I'Z afin de choisir la canalisation C1 en aval du transformateur.

Question 3 :

Choisir en justifiant la démarche la section de la canalisation C1.

Question 4 :

Préciser la valeur de la résistance et la valeur de la réactance de la canalisation C1.

Question 5 :

Calculer la valeur de la chute de tension en régime permanent provoquée par C1 (calcul à exprimer en V et en %).

Question 6 :

On considère que l'intensité nominale du moteur est de 137,5 A. La canalisation C2 et la ligne L1 sont choisies avec les mêmes caractéristiques que la canalisation C1. Calculer le courant équivalent I'Z permettant de choisir la canalisation C2.

Question 7 :

Choisir en justifiant la démarche, la section de la canalisation C2.

Question 8 :

Préciser la valeur de la résistance et la valeur de la réactance de la canalisation C2.

---

Question 9 :

Calculer la chute de tension en régime permanent provoquée par cette canalisation (calcul à exprimer en V et en %).

Question 10 :

Le courant équivalent calculé précédemment étant le même pour la ligne L1, on obtient la même section pour cette ligne. Préciser alors la valeur de la résistance et la valeur de la réactance de la ligne L1.

Question 11 :

Calculer la chute de tension en régime permanent provoquée par la ligne L1.  
Donner à présent, la nouvelle valeur en % de la chute de tension totale en ligne.  
Vérifier la compatibilité avec la norme de la chute de tension totale en ligne dans le cas le plus défavorable.

Question 12 :

A partir de tous les éléments précédemment calculés, on cherche à définir les courants de courts-circuits pour le choix du disjoncteur Q1.

Les données à prendre en compte pour le calcul des courants de courts-circuits sont :

- La résistance et la réactance (ramenées au secondaire du transformateur) du réseau amont. Ici, la puissance de court-circuit du réseau amont est de 500 MVA.
- La résistance et la réactance (ramenées au secondaire) d'une phase du transformateur.
- La résistance et la réactance par phase de chaque ligne ou câble d'alimentation.

12.1 – A partir des tableaux récapitulatifs, déterminer les valeurs des résistances et réactances du réseau amont et du transformateur ramenées au secondaire.

12.2 – Présenter sous forme de tableau les résultats de calcul concernant :

- la résistance de chaque élément (réseau, transformateur et câbles)
- la réactance de chaque élément.

12.3 – Calculer la valeur la valeur du court-circuit vis-à-vis du disjoncteur Q1.

12.4 – Calculer la valeur du courant de court-circuit dans le câble C1 lors d'un court-circuit triphasé à l'entrée du moteur M1.

CORRIGE DE L'EXERCICE D'APPLICATION : Distribution Basse Tension d'un atelier de production.

Question 1 : I nominale secondaire du transformateur =  $\frac{S}{\sqrt{3} \times U} = 160000 / (410 \times 1,732) = 225 \text{ A}$

Question 2 : Choix de 3 câbles (cuivre) isolés, PR, mode de pose : lettre F.

$$\begin{array}{llll} K1 = 1 & K2 = 0,82 & K3 = 0,91 & K = 0,746 \\ IZ = In = 225 \text{ A} & & I'Z = IZ/K = 302 \text{ A} & \end{array}$$

Question 3 : Lettre de sélection : F      Section = 95 mm<sup>2</sup>

Question 4 : Câble C1      résistance = 22,5 x 80 / 95 = 19 mΩ  
Réactance = 0,08 x 80 = 6,4 mΩ

Question 5 : Δ U C1      Δ U = 0,42 x 225 x 0,08 = 7,56 V  
Δ U % = 100 x 7,56 / 410 = 1,84 %

Question 6 : In = 137,5 A      K = 0,746      I'Z = 137,5 / 0,746 = 184,3 A

Question 7 : S = 50 mm<sup>2</sup>

Question 8 : Câble C2      R = 22,5 x 55 / 50 = 24,75 mΩ  
X = 0,08 x 55 = 4,4 mΩ

Question 9 : Δ U C2      Δ U = 0,75 x 137,5 x 0,055 = 5,672 V  
Δ U % = 100 x 5,672 / 410 = 1,38 %  
Δ U total = Δ U C1 + Δ U C2 = 1,84 + 1,38 = 3,22 %

Question 10 : S = 50 mm<sup>2</sup>      R = 22,5 x 25 / 50 = 11,25 mΩ  
X = 0,08 x 25 = 2 mΩ

Question 11 : Δ U L1      Δ U = 0,75 x 137,5 x 0,025 = 2,58 V  
Δ U % = 100 x 2,58 / 410 = 0,629 %  
Δ U total = 3,22 + 0,629 = 3,849 % < 8 % bon

Question 12 :  
Questions 12.1 et 12.2

	R (mΩ)	X (mΩ)	Z (mΩ)
Réseau 500 MVA	0,05	0,35	
Transformateur HT/BT	15,63	39,02	
Câble C1	19	6,4	
Total pour Q1	34,63	45,42	57,11
Jeu de barres B1	0,06		
Câble C2	24,75	4,4	
Ligne L1	11,25	2	
Total pour Moteur	70,63	52,42	87,96

Question 12.3      I<sub>cc</sub> (Q1) = 410 / (1,732 x 57,11) = 4,14 kA

Question 12.4      I<sub>cc</sub> (M) = 410 / (1,732 x 87,96) = 2,69 kA