

5 Chapitre 5 : Calcul des installations

5.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons voir les étapes du dimensionnement et choix des éléments de l'installation électrique basse tension, à savoir :

- ✓ Le calcul du bilan de puissance ;
- ✓ Le calcul du courant d'emploi I_B
- ✓ Le calcul du courant admissible I_Z ;
- ✓ Déterminations des sections de conducteurs et des conducteurs de liaison équipotentielle ;
- ✓ Vérification de la Chute de tension ;
- ✓ Choix du dispositif de protection.

5.2 Détermination des sections de conducteurs basse tension

Le bilan de puissance c'est la première étape essentielle de l'étude de conception d'un réseau électrique industriel. Elle doit cerner et localiser géographiquement les valeurs des puissances actives et réactives.

Selon l'étendu du site, les puissances installées et leurs répartitions, l'installation sera divisée en plusieurs zones géographiques. Le bilan des puissances actives et réactives sera alors fait pour chaque zone en appliquant, aux puissances installées, les facteurs d'utilisation propre à chaque récepteur.

5.2.1 Principe de la méthode

Le choix de la section des canalisations et du dispositif de protection doit satisfaire plusieurs conditions nécessaires à la sécurité de l'installation.

La canalisation doit :

- ⇒ Véhiculer le courant maximal d'emploi et ses pointes transitoires normales ;
- ⇒ Ne pas générer des chutes de tension supérieures aux valeurs admissibles.

Le dispositif de protection doit :

- ⇒ Protéger la canalisation contre toutes les surintensités jusqu'au courant de court-circuit.
- ⇒ Assurer la protection des personnes contre les contacts indirects.

Le logigramme de la figure 24 résume le principe de la méthode qui peut être décrite par les étapes suivantes :

1ère étape :

- Connaissant la puissance d'utilisation, on détermine le courant maximal d'emploi I_B et on en déduit le courant assigné I_n du dispositif de protection.
- On calcule le courant de court-circuit maximal I_{cc} à l'origine du circuit et on en déduit le pouvoir de coupure PdC du dispositif de protection.

2ème étape :

- Selon les conditions d'installation (mode de pose, température ambiante, ...), on détermine le facteur global de correction f .
- En fonction de I_n et f , on choisit la section adéquate du conducteur.

3ème étape :

- Vérification de la chute de tension maximale
- Vérification de la tenue des conducteurs à la contrainte thermique en cas de court-circuit
- Pour les schémas TN et IT, vérification de la longueur maximale relative à la protection des personnes contre les contacts indirects.

La section du conducteur satisfaisant toutes ces conditions est alors retenue.

5.3 Bilan de puissance :

Le bilan de puissance est un outil qui permet de dimensionner l'installation à partir de la connaissance de la puissance des différents récepteurs. Il s'agit d'une première étape essentielle dans la recherche sur la conception des réseaux électriques industriels. Il doit géographiquement identifier et localiser les valeurs de puissance active et réactive de tous les récepteurs.

5.3.1 Détermination de la puissance :

La puissance installée n'est pas la somme arithmétique de la puissance de tous les récepteurs. Sa détermination nécessite la connaissance de la puissance et la localisation des différents récepteurs pour déduire la puissance d'utilisation de chacun, et par la suite la détermination de la puissance requise du transformateur.

5.3.2 La puissance installée :

La puissance active installée, dans une installation électrique industrielle représente la somme des puissances actives nominales de tous les récepteurs. Cette puissance servira ensuite, au

calcul des puissances réellement consommées et ce, en utilisant des facteurs d'utilisation et de simultanéité correspondant à chaque niveau de l'installation.

$$P_n = \Sigma P_{nom}(\text{Récepteur}) \quad (4)$$

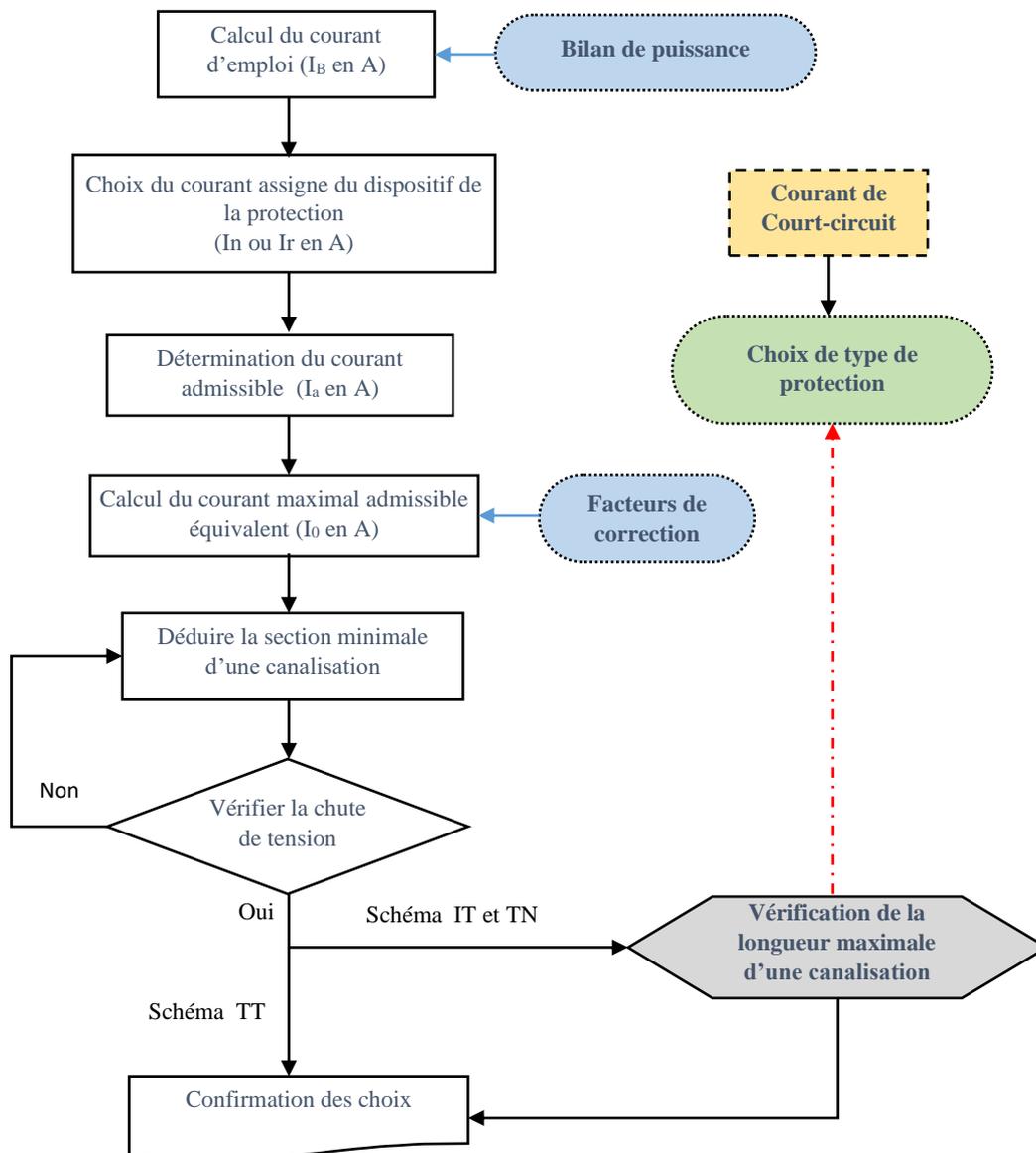


Figure 24: Logigramme du choix des canalisations et du dispositif de protection

5.3.3 La puissance absorbée

La puissance absorbée P_a d'un récepteur quelconque est obtenue à partir de sa puissance nominale. Elle est donnée par la puissance nominale P_{nom} , le rendement unitaire η et le facteur de puissance $\cos\varphi$.

$$P_a = \frac{P_{nom}(\text{Récepteur})}{\eta \cos(\varphi)} \quad (5)$$

La valeur de la puissance apparente est supérieure à la valeur de la puissance absorbée, cette différence représente une marge d'erreur acceptable lors de la phase de conception. Pour des raisons de (facilité le calcul), on suppose généralement que la puissance absorbée est la somme arithmétique de la puissance apparente de chaque récepteur (si toutes les charges ont le même facteur de puissance).

5.3.4 La puissance utilisée

La puissance utilisée est définie comme la partie de la puissance nominale réellement utilisable. Pratiquement tous les récepteurs ne sont pas toujours utilisés à leur puissance maximale.

Son estimation permet d'évaluer la puissance réellement utilisée, suivant l'équation 6. Néanmoins sa détermination nécessite la connaissance du facteur d'utilisation K_u .

$$P_u(\text{KV A}) = P_a \times K_u \quad (6)$$

K_u : facteur d'utilisation ;

Il traduit le fait : qu'un ensemble de récepteurs ne soit pas utilisé en même temps.

5.3.4.1 Facteur d'utilisation k_u

Il traduit le fait que le régime de fonctionnement d'un récepteur peut être inférieur à la puissance nominale. Il s'applique individuellement à chaque récepteur (circuits terminaux).

Tableau 7: Facteur d'utilisation

Utilisation	K_u
Force motrice	0,75 à 1
Eclairage	1
Chauffage	1
Ventilation	1
PC	1

5.3.5 Puissance foisonnée

La puissance foisonnée P_f d'une distribution est égale à la somme des puissances absorbées et valorisées par les facteurs suivants :

$$P_f = K_s \times K_d \times P_u \quad (7)$$

K_s : facteur de simultanéité ;

K_d : facteur d'extension ;

Il traduit le fait :

- Il s'applique à chaque regroupement de récepteurs (distributions ou tableaux divisionnaires)

- Prévoir des extensions dans l'avenir.

5.3.5.1 Facteur de simultanéité K_s

La détermination des facteurs de simultanéité nécessite la connaissance détaillée de l'installation considérée et l'expérience des conditions d'exploitation, notamment pour les moteurs et les prises de courant.

Tableau 8: Facteur de simultanéité selon le nombre de récepteurs

<i>Nombres de récepteurs</i>	<i>Facteurs de simultanéité k_s</i>
1 à 3	0.9
4 à 5	0.8
5 à 9	0.7
10 et plus	0.6

Pour les circuits de prises de courant le facteur de simultanéité est calculé par l'équation (8)

$$K_s = 0.1 + \frac{0.9}{n} \quad (8)$$

n : nombre de prises de courant alimentées par le même circuit.

5.3.5.2 Facteur d'extension K_d

Le rôle du facteur d'extension, également appelé facteur de réserve, est de prévoir une augmentation de la puissance absorbée. Le coefficient varie de 1 à 1,3. La valeur du facteur K_d doit être estimée suivant les conditions prévisibles d'évolution de l'installation ; il est au moins égal à 1. A défaut de précision, la valeur 1,2 est souvent utilisée.

5.4 Détermination du courant maximal d'emploi

Le courant maximal d'emploi (I_B) est défini en fonction de l'installation alimentée par la canalisation. Dans le cas de l'alimentation individuelle d'un appareil, le courant I_B sera égal au courant assigné de l'appareil alimenté. En revanche, si la canalisation alimente plusieurs appareils, le courant I_B sera égal à la somme des courants absorbés, en tenant compte des facteurs d'utilisation, de simultanéité et d'extension de l'installation.

Dans le cas de démarrages de moteurs ou de régimes cycliques de charges (poste de soudure par point), lorsque leurs effets thermiques se cumulent, les appels de courant doivent être pris en compte.

En courant continu :

$$I_B = \frac{P}{U} \left(\frac{\text{puissance absorbée (en W)}}{\text{tension de service (en V)}} \right) \quad (9)$$

En courant alternatif :

En monophasé :
$$I_B = \frac{P_f}{U} \tag{10}$$

En triphasé :
$$I_B = \frac{P_f}{\sqrt{3}U} \tag{11}$$

P_f : puissance foisonnée (VA)

U : - Tension entre les deux conducteurs pour une alimentation monophasée.

-Tension entre phases pour une alimentation triphasée.

5.5 Choix du dispositif de protection

Le rôle d'un dispositif de protection électrique (disjoncteur ou fusible) est d'éviter ou de limiter les conséquences destructrices et dangereuses d'une surintensité ou d'un défaut d'isolement, et pour assurer cette protection, l'installation doit être protégée contre :

- Les courants de surcharge : cela correspond au courant maximum circulant dans une installation sans provoquer l'échauffement des conducteurs (sans défaut.) ;
- Les courants de court-circuit, dus, par exemple, à la rupture d'un isolant entre phases ou entre phase et neutre.

La protection dans ces deux cas est assurée par un disjoncteur ou un appareillage à fusible installé en amont dans le tableau de distribution.

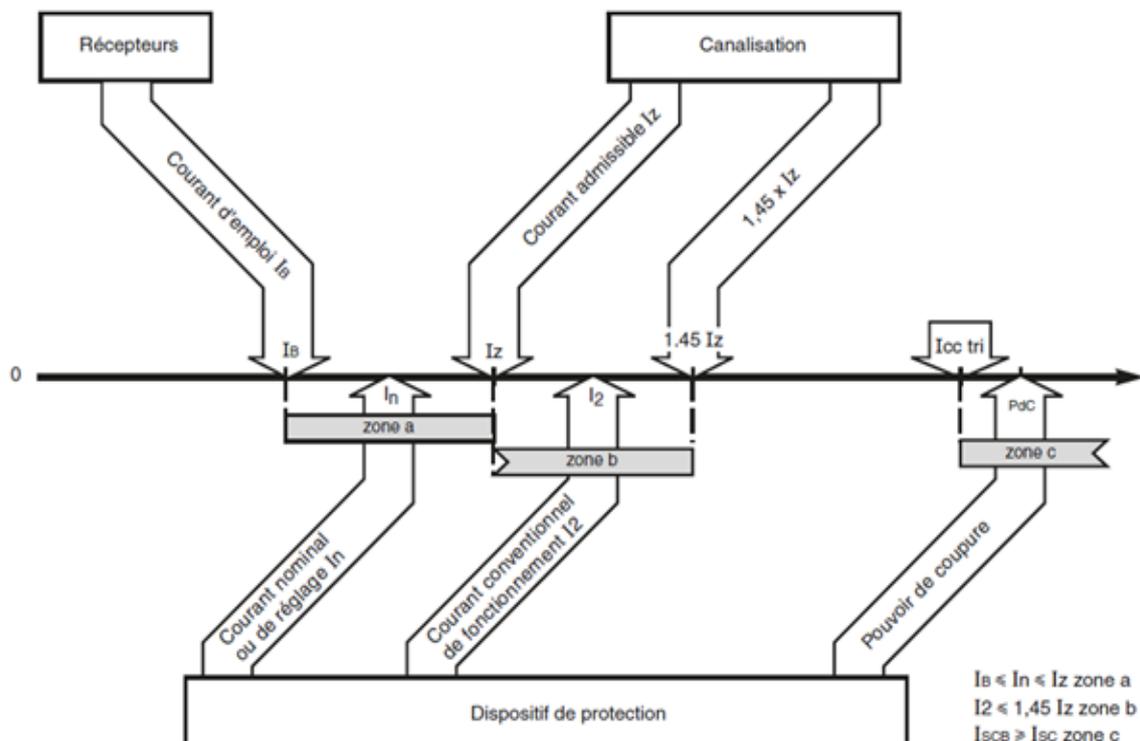


Figure 25: Les courants d'une canalisation

- **Règle générale**

En conformité avec la NF C 15-100, un dispositif de protection (disjoncteur ou fusible) assure correctement sa fonction si les conditions indiquées ci-après sont satisfaites[9].

- **Courant nominal ou de réglage**

Il doit être compris entre le courant d'emploi et le courant admissible I_a de la canalisation :

$I_B < I_n < I_a$, ce qui correspond à la zone *a* de la figure 25.

- **Courant conventionnel de déclenchement**

Il doit satisfaire la relation suivante :

$I_2 < 1.45.I_a$ ce qui correspond à la zone *b* de la figure 25.

Tableau 9: Courant de déclenchement d'un dispositif de protection

Protection	Courant de déclenchement
Disjoncteur domestique	$I_2 = 1.45 \times I_n$
Disjoncteur industriel	$I_2 = 1.30 \times I_r$
Fusible	$I_2 = K_f \times I_n$ ou $K_f = 1.6$ à 1.9 selon les fusibles

- **Pouvoir de coupure**

Il doit être supérieur à l'intensité de court-circuit maximale triphasée ($I_{cc\ tri}$) en son point d'installation : $PdC \geq I_{cc\ tri}$, ce qui correspond à la zone *c* de la figure 25.

5.6 Courants maximal admissibles dans les canalisations « I_0 »

Il s'agit du courant maximal que la canalisation peut transporter en continu sans affecter sa durée de vie.

Le courant maximal admissible est calculé par la canalisation en fonction de ses conditions d'installation :

$$I_0 = \frac{I_a}{f} \tag{12}$$

Avec « *k* » est le facteur de correction globale.

$$f = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \cdot f_n \tag{13}$$

5.6.1 Influence du mode de pose « f_1 »

Ce facteur est calculé suivant le mode de pose utilisé pour la canalisation des conducteurs. Les principaux modes de pose utilisés dans les réseaux industriels sont illustrés dans le tableau 10, avec le numéro et la lettre de sélection associés au mode de pose et les facteurs de correction à appliquer.

Chapitre 5 : Calcul des installations

Tableau 10: Lettre de sélection et facteur de correction de mode de pose "f1"

Type d'éléments conducteurs	Mode de pose	Lettre	f ₁
Conducteurs et câbles multiconducteurs	Dans des caniveaux ouverts ou ventilés	B	1
	Dans des vides de construction ou caniveaux fermés ou faux-plafonds.		0.95
	Dans des goulottes		0.9
	Dans des conduits dans des vides		0.865
	Fixés sur un mur	C	1
	Fixés à un plafond		0.95
câbles multiconducteurs	Sur chemin de câbles ou tablettes non perforées	E.F	1
	Sur des corbeaux		1
	Sur des échelles à câbles		1
	Dans des conduits ou dans des conduits profilés enterrés		0.8
Câbles mono ou multiconducteurs	Enterré	D	1

5.6.2 Influence de la température « f₂ »

Lors de l'encastrement de conduits électriques dans un mur avec des éléments chauffants, il est généralement nécessaire d'appliquer le facteur de réduction afin de réduire le courant admissible.

Ce facteur est calculé suivant la température et la matière utilisée pour la canalisation des conducteurs comme indique dans le tableau 12. Lorsque la température de l'air diffère de 30 °C, le coefficient de correction à appliquer est donné par la formule :

$$f_2 = \sqrt{\frac{\theta_p - \theta_0}{\theta_p - \theta_1}} \quad (14)$$

Tableau 11: Facteurs de correction f2 (influence de la température)

Température du sol (°C) θ ₀	Canalisations enterrées θ ₁ = 20 °C		Canalisations non entrées θ ₁ = 30 °C		
	PVC θ _p = 70 °C	PR et EPR θ _p = 90 °C		PVC θ _p = 70 °C	PR et EPR θ _p = 90 °C
10	1,10	1,07		1,29	1,22
15	1,05	1,04		1,22	1,17
20	-	-		1,15	1,12
25	0,95	0,96		1,07	1,04
30	0,89	0,93			
35	0,84	0,89		0,93	0,96
40	0,77	0,85		0,82	0,91
45	0,71	0,80		0,71	0,87
50	0,63	0,76		0,58	0,82
55	0,55	0,71		-	0,76
60	0,45	0,65		-	0,71
65	-	0,60		-	0,65
70	-	0,53		-	0,58
75	-	0,46		-	0,50
80	-	0,38		-	0,41

θ_p : température maximale admise par l'isolant en régime permanent, °C

θ_0 : température de l'air, °C

Exemple: Une canalisation non enterrée en PR, la température du sol 30 °C.

$$f_2 = \sqrt{\frac{90 - 20}{90 - 30}} = 1.08$$

5.6.3 Influence de la nature du sol « f_3 »

La résistance thermique du sol dépend de la nature et de l'humidité du sol. Le tableau 13 présente les facteurs de correction appliqués en fonction de la résistivité du sol :

Tableau 12: Facteur de correction f_3 (influence de la nature de sol)

Résistivité thermique du terrain Km/W	Facteur de correction	Observation		
		Humidité	Nature du terrain	
0,40	1,25	Pose immergée	Marécages Sable	Argile et calcaire
0,50	1,21	Terrain très humide		
0,70	1,13	Terrain humide		
0,85	1,05	Terrain dit normal		
1,00	1,00	Terrain sec		
1,20	0,94			
1,50	0,86	Terrain sec		
2,00	0,76			
2,50	0,70			
3,00	0,65			

5.6.4 Influence mutuelle des circuits « f_4 »

Les câbles disposés horizontalement (jointifs) « f_{41} » (figure 26)

Lorsque la distance horizontale entre les câbles adjacents est supérieure à deux fois son diamètre extérieur, aucun facteur de réduction n'est nécessaire. Si non, le facteur de réduction est calculé à partir du tableau 15.



Figure 26: Exemple de quatre câbles jointifs

Tableau 13: Facteurs de correction f_{41} (influence de la disposition horizontale)

Lettre de sélection		Nombre de câble multiconducteurs ou groupes de câble non-conducteurs											
		Jointifs											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	12	16	20
B,C,F		1,00	0,80	0,70	0,65	0,60	0,55	0,55	0,50	0,50	0,45	0,40	0,40
C	Murs	1,00	0,85	0,79	0,75	0,73	0,72	0,72	0,71	0,70	Pas de facteur de réduction supplémentaire		
	Plafond	1,00	0,85	0,76	0,72	0,69	0,67	0,66	0,65	0,64			
E, F	Tablettes	1,00	0,88	0,82	0,77	0,75	0,73	0,73	0,72	0,72			
	Echelles	1,00	0,88	0,82	0,80	0,80	0,79	0,79	0,78	0,78			

5.6.5 Les câbles disposés en plusieurs couches « f₄₂ » :

Les facteurs de correction doivent être appliqués, lorsque les câbles sont disposés en plusieurs couches, voir figure 27.



Figure 27: Exemple de trois couches de câbles

Tableau 14: Facteurs de correction f₄₂ (influence de la disposition de couche)

Nombres de couches	2	3	4 ou 5	6 à 8	9 et plus
Facteur de correction	0,80	0,73	0,70	0,68	0,66

5.6.6 Conducteur Neutre chargé « f_n »

Le tableau 16 donne une méthode directe comment déduire le coefficient k_n du neutre chargé.

Tableau 15: Facteur de correction f_n (conducteur chargé)

I _{h3}	f _n	Conducteur neutre
I _{h3} < 15%	1	S _n =S _{ph} (Neutre non chargé (16%))
15% < I _h < 33% Ou N'est pas défini	0,85	$S_n = S_{ph} = S_{pho} \times \frac{1}{0,84}$
33% < I _{h3}	$\frac{0,84}{1,45}$	I _n =1,73 fois le courant calculé Câble multipolaires : $S_n = S_{ph} = S_{pho} \times \frac{1,45}{0,84}$ Câble unipolaires : $S_n = S_{pho} \times \frac{1,45}{0,84}$, $S_{ph} = S_{pho} \times \frac{1}{0,84}$

5.7 Section d'une canalisation BT

Les sections des conducteurs de circuits doivent être déterminées en fonction de courant admissible, déduire à partir du tableau 17 pour les câbles non enterrés, ou à partir du tableau 18 pour les câbles enterrés.

- PVC : Polychlorure de vinyle
- PR : Polyéthylène réticulé ou éthylène-propylène
- 2 : Circuits monophasés ou biphasés
- 3 : Circuits triphasés

Chapitre 5 : Calcul des installations

Tableau 16: Détermination de la section d'un câble non enterré

I ₀		Caoutchouc ou PVC				Butyle ou PR ou éthylène PR				
		B	PVC3	PVC2		PR3		PR2		
Lettre de sélection	C		PVC3		PVC2	PR3		PR2		
	E			PVC3		PVC2	PR3		PR2	
	F				PVC3		PVC2	PR3		PR2
						PVC3		PVC2	PR3	
Section cuivre (mm ²)	1.5	15.5	17.5	18.5	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	161
	35	110	119	126	138	147	158	169	185	200
	50	134	144	153	168	179	192	107	225	242
	70	171	184	196	213	229	246	268	289	310
	95	207	223	238	258	278	298	328	252	377
	120	239	259	276	299	322	346	382	410	437
	150		299	319	344	371	395	441	473	504
	185		341	364	392	424	450	506	542	575
	240		403	430	461	500	538	599	641	679
	300		464	497	530	576	621	693	741	783
	400					656	754	825		940
500					749	868	946		1083	
630					855	1005	1008		1254	
Section aluminium (mm ²)	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	121
	35	86	90	96	103	112	122	126	135	150
	50	104	110	117	125	136	149	154	164	184
	70	133	140	150	160	174	192	198	211	237
	95	161	170	183	195	211	235	241	257	289
	120	186	197	212	226	245	273	280	300	337
	150		227	245	261	283	316	324	346	389
	185		259	280	298	323	363	371	397	447
	240		305	330	352	382	430	439	470	530
	300		351	381	460	440	497	508	543	613
	400					526	600	663		740
	500					610	694	770		856
630					711	808	899		996	

Tableau 17: Détermination de la section d'un câble enterré.

I ₀		Caoutchouc ou PVC		Butyle ou PR ou éthylène PR	
		3 Conducteurs	2 conducteurs	3 conducteurs	2 conducteurs
Section cuivre (mm ²)	1.5	26	32	31	37
	2.5	34	42	41	48
	4	44	54	53	63
	6	56	67	66	80
	10	74	90	87	104
	16	96	116	113	136
	25	123	148	144	173

	35	147	178	174	208
	50	174	211	206	247
	70	216	261	254	304
	95	256	308	301	360
	120	290	351	343	410
	150	328	397	387	463
	185	367	445	434	518
	240	424	514	501	598
	300	480	581	565	677
Section aluminium (mm²)	10	57	68	67	80
	16	74	88	87	104
	25	94	114	111	133
	35	114	137	134	160
	20	134	161	160	188
	70	167	200	197	233
	95	197	237	234	275
	120	224	270	266	314
	150	254	304	300	359
	185	285	343	337	398
	240	328	396	388	458
	300	371	447	440	520

5.8 Section des conducteurs de neutre, de protection (PE), d'équipotentialité

5.8.1 Section du conducteur neutre

Un paradoxe : le conducteur neutre est un conducteur actif dans lequel il ne devrait circuler aucun courant, et pourtant... Il existe un regain d'intérêt pour le conducteur neutre, lié à la prolifération des charges électroniques, à la circulation de courants harmoniques et au risque de surcharge [23].

La norme CEI 60364 § 524.2 et § 524.3 définit les critères de choix de la section du conducteur neutre [24]. Cette règle générale ne considère qu'une faible circulation de courant harmonique de rang 3 dans le réseau.

En régime sinusoïdal, le courant dans le conducteur neutre dépend du déséquilibre entre les charges monophasées raccordées entre phases et neutre. La section du conducteur neutre, déterminée en fonction du courant véhiculé, peut-être :[23]

✚ Section du conducteur neutre inférieure à la section des conducteurs de phases... si les conditions suivantes sont remplies simultanément :

- La section des conducteurs de phases doit être supérieure à 16 mm² Cuivre ou 25 mm² Aluminium ;
- La section du conducteur neutre doit être au moins égale à 16 mm² Cuivre ou 25 mm² Aluminium ;
- Les charges alimentées en service normal sont supposées équilibrées, avec un taux d'harmonique de rang 3 inférieur à 15 % ;

- Le conducteur neutre doit être protégé contre les surintensités.
- ✚ Section du conducteur neutre égale à la section des conducteurs de phases. C'est le cas général, en particulier dans les circuits monophasés à 2 conducteurs, ou lorsque la section des conducteurs de phases est inférieure à 16 mm^2 Cuivre ou 25 mm^2 Aluminium. C'est également vrai dans le cas d'alimentation des charges non linéaires et que le taux d'harmonique 3 se situe dans la fourchette de 15 à 33% ;
- ✚ Section du conducteur neutre supérieure ou égale à la section des conducteurs de phases, dans le cas d'alimentation de charges non linéaires et que le taux d'harmonique 3 dépasse 33 %. L'intensité dans le conducteur neutre est alors prépondérante pour la détermination de la section des conducteurs.

5.8.2 Section des conducteurs de protection (PE)

Dans une installation basse tension, les conducteurs de protection assurent l'interconnexion des masses d'utilisation et l'écoulement à la terre des courants de défaut d'isolement. Les conducteurs d'équipotentialité permettent de mettre au même potentiel, ou à des potentiels voisins, des masses et des éléments conducteurs [9].

5.8.2.1 Section des conducteurs de protection entre transformateur HTA/BT et tableau principal BT (voir figure 28)

Le tableau 18 donne les valeurs des sections des conducteurs de protection (en mm^2) en fonction de la puissance nominale du transformateur HTA/BT, du temps de fonctionnement t (en seconde) de la protection HTA. Lorsque la protection est assurée par un fusible, la section à prendre en compte correspond à $t = 0,2$, et de la matière isolante et de la nature du métal du conducteur.

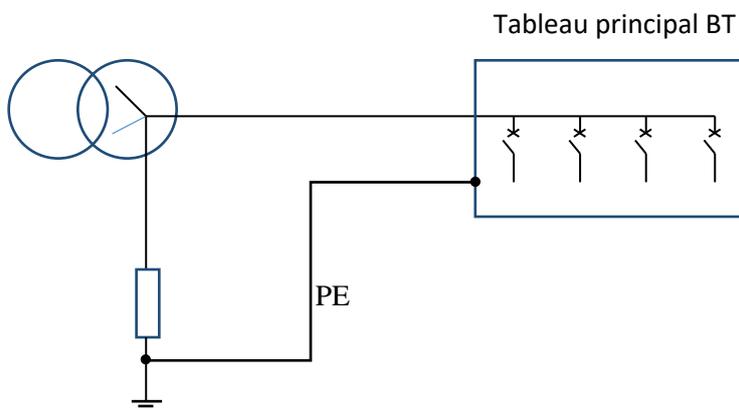


Figure 28: Conducteur PE entre transformateur et tableau principal BT

Chapitre 5 : Calcul des installations

Tableau 18: Section des conducteurs de protection entre transformateur HTA/BT et tableau principal BT

Puissance du transformateur (kVA)		Nature des conducteurs		Conducteurs nus			Conducteurs isolés au PVC			Conducteurs isolés au PR		
Tension		Cuivre	t(s)	0.2 s	0.5 s	-	0.2 s	0.5 s	-	0.2 s	0.5 s	-
127/220 V	230/400 V	Aluminium		-	0.2 s	0.5 s	-	0.2 s	0.5 s	-	0.2 s	0.5 s
≤ 63	≤ 100	Section des conducteurs de protection S _{PE} (mm ²)		25	25	25	25	25	25	25	25	25
100	160			25	25	35	25	25	50	25	25	35
125	200			25	35	50	25	35	50	25	25	50
160	250			25	35	70	35	50	70	25	35	50
200	315			35	50	70	35	50	95	35	50	70
250	400			50	70	95	50	70	95	35	50	95
315	500			50	70	120	70	95	120	50	70	95
400	630			70	95	150	70	95	150	70	95	120
500	800			70	120	150	95	120	185	70	95	150
630	1000			95	120	185	95	120	185	95	120	150
800	1250			95	150	185	120	150	240	95	120	185

5.8.2.2 Section des conducteurs de protection des masses basse tension : (PE)

La section du conducteur PE est définie en fonction de la section des phases (pour le même métal conducteur) suivant le tableau 19 :

Tableau 19: Section du conducteur PE des masses BT

Schéma de liaison de la terre	Type de circuit	Section PE
IT et TN-S	Inclus $S_{ph} \leq 16 \text{ mm}^2$ $16 \text{ mm}^2 \leq S_{ph} \leq 35 \text{ mm}^2$ $S_{ph} \geq 35 \text{ mm}^2$	$S_{PE} = S_{ph}$ $S_{PE} = 16 \text{ mm}^2$ $S_{PE} = S_{ph} / 2$
	Séparé	2.5 mm ² avec protection mécanique 4 mm ² sans protection mécanique
TN-C	Cuivre Aluminium	10 mm ² 16 mm ²
TT	Cuivre Aluminium	25 mm ² 35 mm ²

5.8.3 Section des conducteurs d'équipotentialité

5.8.3.1 Conducteur d'équipotentialité principale

La section du conducteur d'équipotentialité principal doit être au moins égale à la moitié de la section du plus grand conducteur de protection de l'installation, avec un minimum de 6 mm². Toutefois, elle peut être limitée à 25 mm² pour le cuivre ou 35 mm² pour l'aluminium.

5.8.3.2 Conducteur d'équipotentialité supplémentaire

Les conducteurs d'équipotentialité permettent de mettre au même potentiel, ou à des potentiels voisins, des masses et des éléments conducteurs.

Si ce conducteur relie deux masses, sa section doit être supérieure à la plus petite des sections des conducteurs de protection reliés à ces masses (voir figure 29-a).

Si ce conducteur relie une masse à un élément conducteur, sa section doit être supérieure à la moitié de la section du conducteur de protection relié à cette masse (voir figure 29-b).

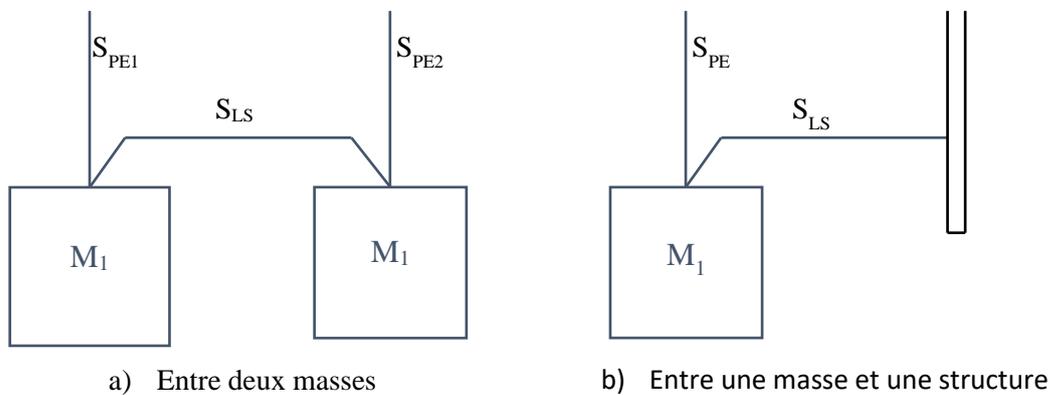


Figure 29: Section des conducteurs d'équipotentialité supplémentaire

5.8.3.3 Section des conducteurs PEN

Le conducteur de protection assure également la fonction du neutre, dans le cas du schéma TN-C. Dans ce cas la section du PEN doit être au moins égale à la plus grande valeur résultant des contraintes suivantes :[19]

- $S_{PEN} \geq \begin{cases} 10 \text{ mm}^2 & \text{pour le cuivre} \\ 16 \text{ mm}^2 & \text{pour l'aluminium} \end{cases}$
- Répondre aux conditions relatives au conducteur PE ;
- Répondre aux conditions imposées pour la section du conducteur neutre.

5.9 Vérification des chutes de tension

L'impédance d'une canalisation est faible mais non nulle : lorsqu'elle est traversée par le courant d'emploi, il y a chute de tension entre son origine et son extrémité. Or le bon fonctionnement d'un récepteur est conditionné par la tension à ses bornes [25].

Il est donc nécessaire de limiter les chutes de tension en ligne par un dimensionnement correct des canalisations d'alimentation. La limite maximale de la chute de tension varie d'un pays à l'autre. Conformément à la norme NF C 15-100 § 525, la chute de tension entre l'origine de l'installation et tout point d'utilisation ne doit pas être supérieure aux valeurs du tableau suivant

Tableau 20: Chute de tension admissibles dans les réseaux BT[26]

Type d'installation	Eclairage	Autres usages
Alimentation depuis le réseau BT de distribution publique	3%	5%
Alimentation par un poste privé HTA/BT	6%	8%

Chapitre 5 : Calcul des installations

Lorsque la chute de tension est supérieure aux valeurs du tableau 20, il est nécessaire d'augmenter la section de certains circuits afin de revenir dans les domaines de tolérance.

La chute de tension sur une canalisation est calculée par la formule :

$$\Delta V = b \left(\rho_1 \frac{L}{S} \cos \varphi + \lambda L \sin \varphi \right) \times I_B \quad (16)$$

- ΔV : chute de tension, en volt
- b : coefficient $\begin{cases} = 1 \text{ pour circuit triphasé} \\ = 2 \text{ pour circuit monophasé} \end{cases}$
- ρ : résistivité du conducteur en service normal, soit 1,25 fois celle à 20 °C
 $\rho_1 = 0,0225 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ pour le cuivre ; $\rho_1 = 0,036 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ pour l'aluminium
- L : longueur de la canalisation, en mètre
- S : section des conducteurs, en mm^2
- $\cos \varphi$: facteur de puissance ; en l'absence d'indication précise on peut prendre $\cos \varphi = 0,8$
 $(\sin \varphi = 0,6)$
- I_B : courant maximal d'emploi, en ampère
- λ : réactance linéique des conducteurs, en Ω/m

Les valeurs de λ en BT sont :

- $0,08 \times 10^{-3} \Omega/\text{m}$ pour les câbles tripolaires 
- $0,09 \times 10^{-3} \Omega/\text{m}$ pour les câbles unipolaires serrés en nappe  ou en triangle 
- $0,15 \times 10^{-3} \Omega/\text{m}$ pour les câbles unipolaires espacés $d = 8.r$ 

d : distance moyenne entre conducteur

r : rayon des âmes conductrices

On définit la chute de tension relative :

$\frac{\Delta V}{V_n}$ pour les circuits triphasés ou monophasés alimentés entre phase et neutre

$\frac{\Delta V}{U_n}$ pour les circuits monophasés alimentés entre phases (dans ce cas, ΔV représente une chute de tension entre phases)

V_n : tension simple nominale

U_n : tension composée nominale

- Circuits alimentant des moteurs

La chute de tension est calculée en remplaçant le courant d'emploi I_B par le courant de démarrage du moteur.

La norme NF C 15-100 préconise que la chute de tension, en tenant compte de tous les moteurs pouvant démarrer simultanément, soit inférieure à 15 %. Une limitation à 10 % est préférable[9].

5.10 Vérification des contraintes thermiques des conducteurs

Lorsque le courant de court-circuit traverse le conducteur d'une canalisation pendant un temps très court (jusqu'à cinq secondes), l'échauffement est considéré adiabatique ; cela signifie que l'énergie stockée est conservée au niveau du métal du noyau et n'est pas transférée à l'isolant. Par conséquent, il est nécessaire de vérifier si la contrainte thermique du court-circuit est inférieure à la contrainte thermique admissible du conducteur (voir équation 17):

$$t_c I_{cc}^2 \leq k^2 S^2 \quad (17)$$

t_c : temps de coupure du dispositif de protection en seconde ;

S : section des conducteurs en mm² ;

I_{cc} : courant de court-circuit en A.

La valeur de k dépend du matériau de l'âme et de la nature de l'isolant (voir tableau 21).

Tableau 21: Valeur du coefficient k conformément à la norme NF C 15-100

Ame	Isolant	PVC	PR
	Cuivre	115	135
	Aluminium	74	87

Si le temps de coupure est donné, la section doit satisfaire la condition :

$$S \leq \frac{I_{cc}}{k} \times \sqrt{t_c}$$

5.11 Exemple d'application

Considérons le schéma de la figure 30 dont les données sont indiquées ci-après. L'installation alimentant des récepteurs nécessitant une bonne continuité de service, on choisit le schéma de liaison à la terre IT sans neutre distribué.

- Canalisation C2

Elle est constituée d'un câble tripolaire en cuivre isolé au PVC, en pose jointive avec 3 autres câbles multiconducteurs, sur des tablettes perforées dans une température ambiante de 40 °C. Elle est protégée par des fusibles. Elle alimente un récepteur dont les caractéristiques sont :

- puissance utile $P_u = 15$ kW
- rendement $r = 0,89$
- $\cos \varphi = 0,85$
- facteur d'utilisation $b = 0,9$.

- Canalisation C1

Elle est constituée de 3 câbles unipolaires en cuivre isolés au PR, serrés en triangle. Les câbles sont enterrés seuls, sans protection mécanique complémentaire dans un sol de résistivité thermique 0,85 K.m/W et de température 35 °C. Ils sont protégés par un

disjoncteur. La canalisation alimente le récepteur R1 et 3 autres départs dont les valeurs des courants I_B sont données par la figure 30.

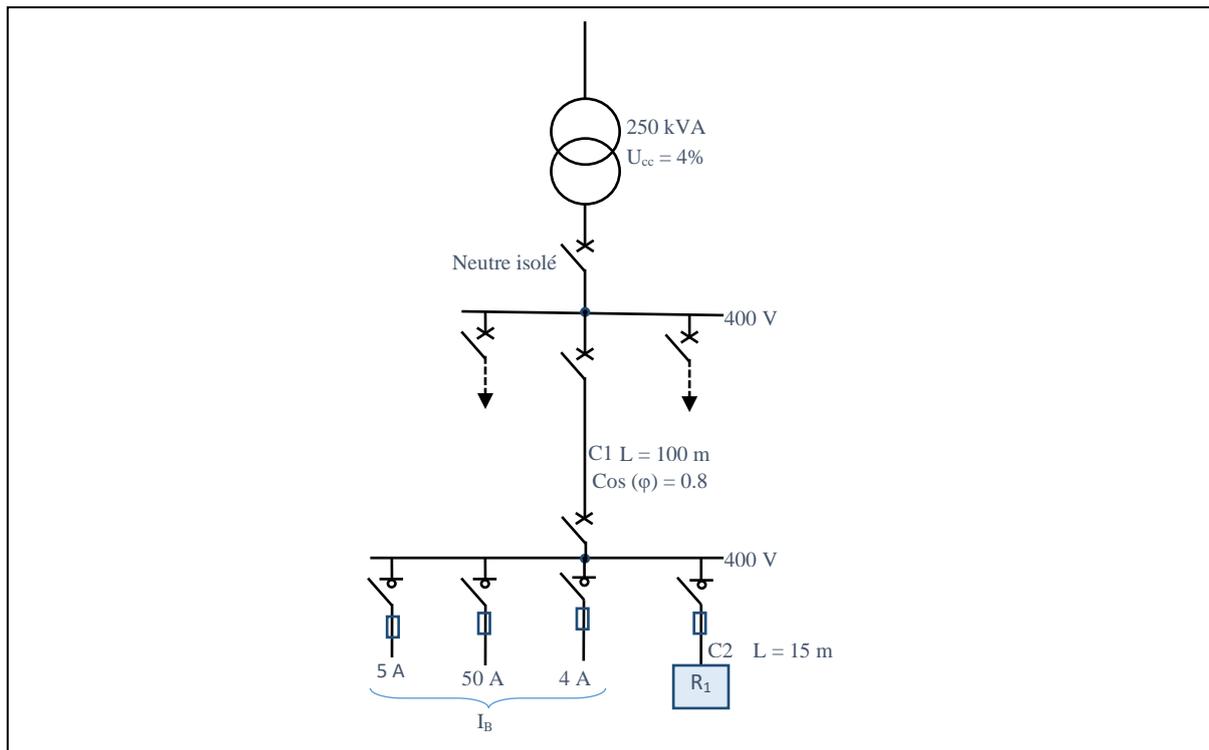


Figure 30: Schéma de l'installation

▪ Détermination du courant maximal d'emploi

❖ Canalisation C2

- $P_u = 15 \text{ kW}$
- La facteur $a = \frac{1}{r \cos \varphi} = \frac{1}{0.89 \cdot 0.85} = 1.32$
- Le facteur d'utilisation $b = 0.9$
- Pour un seul récepteur le facteur de simultanéité est $c = 1$
- Aucune extension n'est prévue, donc $d = 1$
- Pour un réseau triphasé 400 V, le facteur de conversion des puissances en intensité est $e = 1.4$.

On a alors :

$$I_B = P_u \times a \times b \times c \times d \times e = 15 \times 1.32 \times 0.9 \times 1 \times 1 \times 1.4 = 24.9 \text{ A}$$

❖ Canalisation C1

Le courant maximal d'emploi de la canalisation C1 est obtenu en sommant les courants (I_B) de tous les départs alimentés par C1 et en appliquant un facteur de simultanéité estimé à 0,8.

$$I_B = (25 + 50 + 40 + 24.9) \times 0.8 = 115.9 \text{ A}$$

- **Facteurs de correction**

- ❖ **Canalisation C2**

Selon le mode de pose N° 13 et la lettre de sélection E.

Les facteurs de correction à appliquer sont :

- ✓ Température ambiante (voir tableau 11) : $f_2 = 0.87$
- ✓ Groupement de câble (voir tableaux 13 et 14) : $f_{41} = 0.77$ et $f_{42} = 1$

Le facteur de correction global est :

$$f = f_2 \times f_{41} \times f_{42} = 0.87 \times 0.77 \times 1 = 0.67$$

- ❖ **Canalisation C1**

Le tableau 5 donne le mode de pose N° 62 et la lettre de sélection D.

Les facteurs de correction à appliquer sont :

- ✓ Température ambiante (voir tableau 11) : $f_2 = 0.89$
- ✓ Groupement de câble (voir tableaux 13) : $f_{41} = 1.05$
- ✓ Groupement de câble (voir tableau 14) : $f_{42} = 1$

Le facteur de correction global est :

$$f = f_2 \times f_{41} \times f_{42} = 0.89 \times 1.05 \times 1 = 0.935$$

- **Détermination de la section et choix du dispositif de protection**

- ❖ **Canalisation C2**

$$I_B = 24.9 \text{ A}$$

$$f = 0.67$$

Le courant nominal du fusible doit vérifier la condition $I_n \geq I_B$

On choisit le fusible de calibre $I_n = 25 \text{ A}$

Pour $10 \text{ A} < I_n \leq 25 \text{ A}$, le courant I_z de la canalisation protégée par ce fusible est :

$$I_z = k_3 \cdot I_n = 1.21 I_n = 1.21 \times 25 = 30.3 \text{ A}$$

Le courant équivalent que la canalisation doit pouvoir véhiculer dans les conditions standards

d'installation est : $I'_z = \frac{I_z}{f} = \frac{30.3}{0.67} = 45.1 \text{ A}$

Le tableau 17 (lettre de sélection E, PVC3, cuivre) donne une section minimale $S = 10 \text{ mm}^2$ qui a un courant admissible $I_0 = 60 \text{ A}$.

❖ Canalisation C1

$$I_B = 115.9 \text{ A}$$

$$f = 0.935$$

Pour un disjoncteur réglable, le courant de réglage doit vérifier la condition $I_r \geq I_B$;
On choisit $I_r = 120 \text{ A}$.

Le courant I_z de la canalisation protégée par ce réglage est :

$$I_z = I_n = 120 \text{ A}$$

Le courant équivalent que la canalisation doit pouvoir véhiculer dans les conditions standards d'installation est : $I'_z = \frac{I_z}{f} = \frac{120}{0.935} = 128.3 \text{ A}$

Le tableau 17 (lettre de sélection D, PR3, cuivre) donne une section minimale $S = 25 \text{ mm}^2$ qui a un courant admissible $I_0 = 144 \text{ A}$.

▪ Vérification de la chute de tension

❖ Canalisation C2

$$S = 10 \text{ mm}^2, L = 15 \text{ m}, I_B = 24.9 \text{ A}$$

Le câble est tripolaire, on a donc $\lambda = 0.08 \times 10^{-3} \Omega/\text{m}$

Le facteur de puissance est: $\cos \varphi = 0.85$, d'où $\sin \varphi = 0.53$

$$\text{On en déduit } \Delta V = \left(0.0225 \times \frac{15}{10} \times 0.85 + 0.08 \times 10^{-3} \times 15 \times 0.53 \right) \times 24.9$$

$$\Delta V = 0.73 \text{ V}$$

$$\text{D'où : } \frac{\Delta V}{V_n} = \frac{0.73}{230} = 0.3\%$$

La chute de tension totale est 4,2 % (la chute de tension dans la canalisation C1 est 3,9 %, voir ci-dessous). Elle est inférieure à la chute de tension admissible (5 %) indiquée dans le tableau 20.

❖ Canalisation C1

$$S = 25 \text{ mm}^2, L = 100 \text{ m}, I_B = 115.9 \text{ A}$$

Les 3 câbles unipolaires sont serrés en triangle, on a donc $\lambda = 0.09 \times 10^{-3} \Omega/\text{m}$

Le facteur de puissance est : $\cos \varphi = 0.8$, d'où $\sin \varphi = 0.6$

Pour un circuit triphasé $b = 1$

Pour le cuivre $\rho_1 = 0.0225 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$

$$\text{On en déduit } \Delta V = \left(0.0225 \times \frac{100}{25} \times 0.8 + 0.09 \times 10^{-3} \times 100 \times 0.6 \right) \times 115.9$$

$$\Delta V = 8.97 \text{ V}$$

$$D'o\grave{u} : \frac{\Delta V}{V_n} = \frac{8.97}{230} = 3.9\%$$

▪ Vérification de la contrainte thermique

❖ Canalisation C2

Pour une protection par fusible, le courant à prendre en compte est le courant de court-circuit minimal à l'extrémité de la canalisation. Pour le schéma *IT*, c'est le courant de court-circuit pour un double défaut phase-terre.

En appliquant la méthode conventionnelle, on calcule :

$$I_{cc\ min} = \frac{\sqrt{3} \times V_n \times 0.8}{2L_2\rho \left(\frac{1}{S_{ph}} + \frac{1}{S_{PE}} \right)} = \frac{\sqrt{3} \times 230 \times 0.8}{2 \times 15 \times 0.027 \left(\frac{1}{10} + \frac{1}{10} \right)} = 1.97\ kA$$

La caractéristique temps-courant du fusible de 25 A nous donne un temps de fusion $t_f = 5\ ms$

Pour un courant de 1.97 kA.

La contrainte thermique maximale est donc :

$$I_{cc\ min}^2 \times t = (1.97 \times 10^3)^2 \times 5 \times 10^{-3} = 19.4 \times 10^3\ A^2 \times s$$

La contrainte thermique admissible par le câble est :

$$k^2 \times S^2 = (115)^2 \times (10)^2 = 1322 \times 10^3\ A^2 \times s$$

La section $S = 10\ mm^2$ supporte donc largement la contrainte thermique du fusible.

❖ Canalisation C1

Le courant de court-circuit maximal au niveau du disjoncteur (en négligeant la liaison reliant le disjoncteur au transformateur) est :

$$I_{cc} = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_n} \times \frac{1}{U_{cc}} = \frac{250 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 400} \times \frac{100}{4} = 9.02\ kA$$

On suppose que le déclencheur du disjoncteur soit temporisé à 0,1 seconde, la contrainte thermique maximale du court-circuit est alors :

$$I_{cc\ min}^2 \times t = (9.02 \times 10^3)^2 \times 0.1 = 8.14 \times 10^6\ A^2 \times s$$

La contrainte thermique admissible par le câble est :

$$k^2 \times S^2 = (143)^2 \times (25)^2 = 12.78 \times 10^6\ A^2 \times s$$

La section $S = 25\ mm^2$ supporte donc la contrainte thermique du disjoncteur.

▪ Conclusion

Les sections à retenir sont :

- Canalisation C1 : $3 \times 35\ mm^2 + 1 \times 16\ mm^2$ cuivre

Chapitre 5 : Calcul des installations

- Canalisation C2 : $3 \times 10 \text{ mm}^2 + 1 \times 10$ cuivre