

RÉPUBLIQUE DU SÉNÉGAL



ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE THIÈS

Gm. 0330

PROJET DE FIN D'ÉTUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGÉNIEUR DE CONCEPTION

TITRE : Etude Des Installations Electriques
De La S.A.R.

AUTEUR : Modou Falilou Ndiaye

DIRECTEURS : Igor Sabatin (E.P.T) — Al Ousseynou
Kamara (S.A.R).

DATE : MAI 1987

Genie : Mécanique

Aux mémoires de mes défunts,

A tous mes parents

et

amis

REMERCIEMENTS

Mes sincères remerciements à :

- L'ensemble du personnel du Service Electricité de la S.A.R, en particulier mon Directeur Externe Mr. Al Ousseynou Kamara, Chef de Service Adjoint
- Mon Directeur Interne, Professeur Igor Sabatin pour sa constante sollicitude et ses précieux conseils
- La famille Sabatin qui m'a accepté les dérangements de toutes heures.
- L'ensemble des professeurs de l'école qui ont contribué à ma formation.

11

SOMMAIRE

Nous avons d'abord estimé la puissance consommée (quelque 2120 kVA) afin d'analyser la possibilité d'alimenter toute l'usine par un seul groupe Diesel-alternateur Crepelle. Ensuite nous avons calculé les courants de court-circuit et vérifié les protections du réseau.

Le dimensionnement des câbles, en particulier celui de transfert (liaison des deux centrales électriques) a été effectué selon les différents modes d'alimentation que sont:

modes existants :

1. Un groupe diesel de 800 kVA en parallèle avec un autre 2300 kVA
2. Deux groupes diesel de 800 kVA avec un autre de 2300 kVA

mode en perspective :

3. Un groupe de 2300 kVA alimente toute l'usine.

Enfin, des conclusions et recommandations ont été faites pour une meilleure exploitation des installations.

TABLE DES MATIERES:

	<u>pages:</u>
Remerciements	I
Sommaire	II
Introduction	1
Chapitre I : Présentation de la Société	3
Chapitre II : Schéma unifilaire Général et Estimation de la puissance Consommée	8
II.1. Schéma unifilaire Général	8
II.2. Estimation de la puissance consommée	10
Chapitre III : Calcul des courants de court- circuit et vérification des protections .	25
III.1. Calcul des courants de court-circuit.	25

III.1.1.	Calcul du courant de base, I_B .	27
III.1.2.	Calcul de l'impédance de base, Z_B .	28
III.1.3.	Calcul des impédances relatives, Z_{pu} .	28
III.1.4.	Schema équivalent des impédances relatives	36
III.1.5.	Calcul des impédances relatives résultantes entre sources et points de défaut respectifs, Z_{puE} .	43
III.1.6.	Calcul proprement dit du courant de court-circuit triphasé stationnaire, I_{cc} .	43
III.2.	Vérification des protections.	55
III.2.1.	Courant nominal, I_n .	63
III.2.2.	Courant de réglage du magnétique, I_{rm} .	65
III.2.3.	Pouvoir de coupure, Pdc .	66
III.2.4.	Pouvoir de fermeture, Pdf .	73
III.2.5.	Etude de sélectivité.	108

Chapitre IV : Dimensionnement des câbles 118

IV.1. Caractéristiques des câbles 119

IV.2. Méthodes de calcul 120

Chapitre V : Conclusions et Recommandations

Annexes : 134

Bibliographie 139

INTRODUCTION

Toute installation électrique, telle qu'elle soit, pourvu que certains récepteurs soient remplacés ou ajoutés et peut-être même sous la seule influence de l'environnement, change ou perd l'essentiel de ses caractéristiques de départ au fur et à mesure de son exploitation.

Un service d'entretien en électricité doit suivre de près cette évolution. Son inexistence ou son incompetence est souvent à l'origine de manifestations de nuisances imputables à l'électricité.

À la lumière de cette philosophie, nous avons proposé à la S.A.R. de faire cette présente étude qui se porte en général sur la protection et les canalisations.

La proposition fut bien accueillie par la société qui connaît et jusqu'à présent d'ailleurs, des problèmes de disjonction indésirable du disjoncteur BTQ3 installé sur le câble de transfert reliant les deux centrales de la S.A.R.

Ce problème trouve sa solution dans ce rapport effectué dans le cadre du projet de fin d'études pour l'obtention du grade d'ingénieur de conception en raison de six heures par semaine pendant un semestre.

Par ailleurs, nous avons aussi étudié l'installation éventuellement alimentée par un seul groupe Crepelle.

Chapitre I : Présentation de la société.

La S.A.R (Société Africain de Raffinage) est une société anonyme implantée dans la zone de développement industriel à 18 kilomètres de Dakar. Son siège social se trouve à Dakar, au 15 Boulevard de la République.

Elle a été créée le 1^{er} Avril 1961 sur l'initiative du Gouvernement Sénégalais et de la Société Africaine de Pétrole (S.A.P) avec le concours des groupes pétroliers ESSO, MOBIL, TEXACO, B.P. et TOTAL qui participent jusqu'à ce jour à la distribution des produits finis.

Les travaux de construction ont duré dix-huit (18) mois, de Juin 1962 à Novembre 1963, pour une enveloppe financière de quatre milliards de FCFA (4000000000 FCFA).

La première opération a eu lieu le 31 Octobre 1963, à la réception de la première cargaison de pétrole brut (Pétrole PAUTHIER) en provenance de l'Algérie (pétrole Saharien).

La société a été inaugurée le 27 Janvier 1964 par Son Excellence Léopold Sédar Senghor alors Président de la République du Sénégal.

La capacité de traitement était à l'origine de sept cent quarante mille tonnes (740.000 T), mais à partir de 1982 il y a eu des travaux d'extension.

Extension.

Au début, la S.A.R. avait pour objectif, de ravitailler la totalité du marché Sénégalais et de satisfaire la demande des Etats voisins (Mali, Mauritanie).

L'accroissement de la demande de produits pétroliers au niveau de la zone de desserte et le souci de rendre plus performant (au plan de la gestion) l'outil de raffinage, ont rendu nécessaire l'extension des installations de la raffinerie. La capacité de traitement de la S.A.R. est alors passée à un million trois cent cinquante mille tonnes (1.350.000 T).

La société tourne actuellement à environ 60% de sa capacité théorique de traitement car les débouchés sont restreints.

Répartition du Capital

Le capital social de la S.A.R. s'élève à un milliard de FCFA (1.000.000.000 FCFA) divisé en deux cent mille actions (200.000) de cinq mille francs (5000 FCFA) chacune. Il se répartit comme suit

Actionnaires	Nationalité	Pourcentage
ELF Aquitaine	Française	30%
BP	Hollando-Britannique	11,8%
Mobil. Oil	Américain	11,8%
Shell	Hollando-Britannique	11,8%
Texaco	Américaine	11,8%
Total	Française	11,8%
Etat du Senegal (B.N.D.S)	Sénégalaise	10%
Esso	Américaine	1%
total:		100%

Les actions sont réparties en deux catégories :

- les actions ordinaires attribuées à tous les actionnaires, sauf au Gouvernement Sénégalais
- des actions privilégiées, que détient le même Etat.

Avec 10% des actions, l'Etat Sénégalais peut bénéficier du double de son apport dans la répartition des bénéfices. Il jouit d'un système de dividende prioritaire égal au dixième des bénéfices attribués, sans préjudice du droit normal attaché aux actions qu'il détient.

- Si les bénéfices de la S.A.R sont supérieurs à 12% des fonds propres, le surplus est versé à l'Etat
- si les bénéfices sont inférieurs à 12% des fonds propres, l'Etat devra par conséquent accorder une subvention à la S.A.R.

La Convention d'Etablissement

Elle a été signée en 1962 entre la S.A.R, représentée par Monsieur Tenaillé, et le Gouvernement Sénégalais représenté par Monsieur Mamadou Dia, pour une durée de vingt ans (20ans) de 1962 à 1982. Elle a été ensuite prolongée de dix (10) ans, de 1982 à 1992. Elle définit toutes les obligations et les garanties des partenaires et détermine ainsi les régimes fiscal et foncier de la Société en faisant bénéficier à la S.A.R des avantages particuliers.

Actionnaires	Partage des droits et des obligations, des actions au capital	Représentation, au Conseil d'administration	Répartition des bénéfices	Droit à la fourniture de brut	Obligations de reprises des produits finis
B.N.D.S	10	17	19	10	0
ELF	30	33	27	30	0
Distributeurs	60	50	54	60	100

- Le régime fiscal

La S.A.R bénéficie d'un régime fiscal stabilisé jusqu'à l'expiration de la convention d'établissement.

- Le régime foncier

Le Gouvernement du Sénégal a accordé à la S.A.R toutes les autorisations nécessaires pour la construction, sur un terrain de 60 hectares environ des installations industrielles prévues.

Rôle et Importance de la S.A.R.

Sur le plan socio-économique, la S.A.R joue un rôle considérable. Elle contribue à la réduction du chômage et à l'entrée de devises dans le pays.

Signalons en outre que dans la classification des Entreprises par le chiffre d'affaires, la S.A.R occupe la première place sur le plan national et la huitième au niveau de l'Afrique Noire Francophone.

C'est ainsi que :

- en 1976, son chiffre d'affaires était de 18.000.000.000 FCFA
- en 1978 " " " 30.000.000.000 FCFA
- en 1983 " " " 84.000.000.000 FCFA
- en 1984 " " " 105.000.000.000 FCFA
- en 1985 " " " 111.000.000.000 FCFA

Notons enfin que la S.A.R. a un effectif d'un peu moins de 300 personnes dont :

- une vingtaine de cadres
- une soixantaine d'agents de maîtrise
- le reste, employés et ouvriers.

Chapitre II . Schéma unifilaire général et estimation de la puissance consommée

II.1. Schéma unifilaire général . (cf. pli)

L'alimentation en énergie électrique est assurée par cinq groupes électrogènes appartenant à la S.A.R. Trois de construction Duvand datent de 1963 et débitent chacun 380V et les deux autres de construction Crepelle datent de 1982 lors de l'extension et débitent chacun 6600V.

Les trois groupes Duvand dénommés respectivement J304, J305 et J306, de puissance nominale 800 kVA, chacun sont situés dans un même local et débitent en parallèle sur le jeu de barres "BT Normal Ancien".

Les deux autres groupes Crepelle dénommés respectivement J341, J342 sont dans un autre local, contigu au premier et débitent en parallèle sur le jeu de barres "HT". Leur puissance nominale est de 2300 kVA chacun. Le couplage des deux types de groupes se fait par un disjoncteur Selpact, appelé BTQ3 et ceci après avoir abaissé la tension de 6600V par un transfo triphasé $6600\text{V}/380\text{V}$ dénommé TR1. Les conditions de couplage (égalité des tensions, égalité des fréquences et identité des polarités des deux jeux de barres) sont préalablement vérifiées par le synchronoscope

qui donne l'ordre de fermeture au BTQ3.

Signalons, qu'en marche normale, indépendamment du nombre de groupes en marche sur un jeu de barres nous distinguons trois modes de fonctionnement. Un quatrième mode est constitué par la marche en secours.

Chacun de ces modes définis ci-dessous sera examiné lors des prochains chapitres :

- Mode 1 : Un Durand, couplé avec un Crepelle, c'est le mode le plus fréquent (exploitation normale).

- Mode 2 : Ensemble des deux Durand, couplé avec un Crepelle. Il est utilisé lors des démarrages de grosses pompes ou lorsqu'il y'a expédition de produits finis. Notons que dans le premier cas un Durand est immédiatement déconnecté dès que le démarrage est fait.

- Mode 3 : Un Crepelle alimente toute l'installation. Ce mode n'a pas encore vu le jour. Le prochain paragraphe nous montrera s'il est possible ou non de le réaliser.

- Mode 4 : C'est le mode 'Secours'. L'alimentation est assurée par un transfo triphasé 6600V/380V de 315 kVA connecté sur la ligne aérienne SENELEC 6600V qui passe non loin de l'usine.

Le transformateur débite sur le jeu de barres "BT5/P1" (Secours Nouveau) qui dessert quelques départs.

Le passage de la source normale (groupes électrogènes) au secours est automatiquement effectué en cas d'absence de tension normale par un inverseur de source Normal - secours.

II.2. Estimation de la puissance consommée

Pour évaluer la puissance consommée en émettant certaines hypothèses, compte tenu des difficultés rencontrées pour obtenir certaines caractéristiques nominales des charges. Ainsi les rendements des moteurs seront estimés, à la lumière des recommandations du guide de l'installation électrique Merlin Gerin, connaissant la puissance nominale. La charge des transformateurs étant mal définie, elle sera estimée à 80% de la puissance nominale du transfo.

Enfin, les coefficients d'utilisation des différents consommateurs seront estimés à 0,8 (règle générale elf) et les coefficients de simultanéité conformément aux normes UTE 63-410.

Quant au bilan de puissance, il se fera en considérant que l'installation est composée de deux parties reliées par un câble dit de transfert, C_g . (voir schéma unifilaire général) et ceci en fonctionnement normal.

On va appeler ces deux parties respectives du réseau

" Installation côté Durand " (voir fig. 3) et

" Installation côté Crepelle " (voir fig. 4)

d'estimation de la puissance consommée est donnée dans les tableaux 1 et 2.

Ainsi la puissance d'utilisation au deuxième niveau, P_{u_2} est donnée par :

$$- \quad P_{u_2} = 1762 \text{ kW} + 105 \text{ kW} + 139 \text{ kW} = 2006 \text{ kW} \quad \text{l'Installation côté Durand.}$$

$$\text{soit } P_{u_2} = \frac{2006}{0,8} = 2507,5 \text{ kVA} \quad \text{en supposant } \cos\varphi = 0,8$$

$$\underline{P_{u_2} = 2508 \text{ kVA}}$$

- Pour l'Installation côté Crepelle

$$P_{u_2} = 497 \text{ kW} + 89 \text{ kW} + 83 \text{ kW} + 150 \text{ kW} = 819 \text{ kW}$$

$$\text{soit } P_{u_2} = \frac{819}{0,8} = 1024 \text{ kVA} \quad \text{en supposant } \cos\varphi = 0,8$$

$$\underline{P_{u_2} = 1024 \text{ kVA}}$$

- Pour les récepteurs secours

$$P_{u_2} = 139 \text{ kW}$$

$$\text{soit } P_{u_2} = \frac{139}{0,8} = 174 \text{ kVA}$$

$$\underline{P_{u_2} = 174 \text{ kVA}}$$

Finalement la puissance nécessaire correspondante est donnée par la puissance d'utilisation au troisième niveau, P_{u_3} :

$$P_{u_3} = P_{u_2} \cdot k_3.$$

où k_3 désigne le facteur de simultanéité au troisième niveau. Il est fonction du nombre de circuits sur le troisième niveau. Ainsi nous avons :

— Pour les consommateurs secourus :

$$k_{s_3} = 0,6 \quad P_{u_2} = 174 \text{ kVA}$$

$$\text{d'où } P_{u_3} = 174 \text{ kVA} \times 0,6 = 105 \text{ kVA}$$

$$P_{u_3} = 105 \text{ kVA}$$

— Pour l'installation côté Duvaud :

$$k_{s_3} = 0,6 \quad P_{u_2} = 2508 \text{ kVA}$$

$$\text{d'où } P_{u_3} = 2508 \text{ kVA} \times 0,6 = 1504,8 \text{ kVA}$$

$$\underline{P_{u_3} = 1505 \text{ kVA}}$$

— Pour l'installation côté Gepelle :

$$k_{s_3} = 0,6, \quad P_{u_2} = 1024 \text{ kVA}$$

$$\text{d'où } P_{u_3} = 1024 \text{ kVA} \times 0,6 = 614,4 \text{ kVA}$$

$$\underline{P_{u_3} \approx 615 \text{ kVA}}$$

Soit une puissance d'utilisation totale de
 $1505 \text{ kVA} + 615 \text{ kVA} = 2120 \text{ kVA}$ pour
toute l'installation.

$$P_{\text{totale}} = 2120 \text{ kVA}$$

D'où la conclusion qu'un seul groupe Crepelle de
2300 kVA suffit pour alimenter toute l'usine. (A
confirmer par des mesures).

Vérifions maintenant si le transfo TR1 de 1600 kVA
conviendra-t-il alors ?

TR1 doit alimenter "L'Installation côté Durand" et
les consommateurs du tableau BT/P1 de puissance
respective 1505 kVA et 497 kW (soit 621 kVA).

Soit une puissance que doit fournir TR1 de
 $1505 \text{ kVA} + 621 \text{ kVA} = 2126 \text{ kVA}$.

Ce qui montre qu'un transformateur de 1600 kVA
ne suffit.

Pour subvenir aux besoins, il faudra trouver un
deuxième transfo de 1600 kVA qu'on mettra en paral-
lèle avec celui déjà existant.

Une autre solution qui ne sera pas examinée ici
serait de trouver un nouveau jeu de barres qu'on
appellera BT/P1. N (N pour Nouveau) et un transfor.

mateur TR1. N de 800kVA pour l'alimenter.

BT/P1. N sera relié à BT/P1, toujours alimenté par TR1, par un câble muni d'un interrupteur. Certaines charges de BT/P1 seraient alors transférées sur BT/P1. N pour ne pas surcharger le transfo TR1.

L'interrupteur permettrait d'alimenter certains consommateurs de BT/P1. N par TR1 si jamais TR1. N tombait en panne ou des problèmes surgissaient sur BT/P1. N

Ces solutions (1 et 2) sont schématisées aux figures côté.

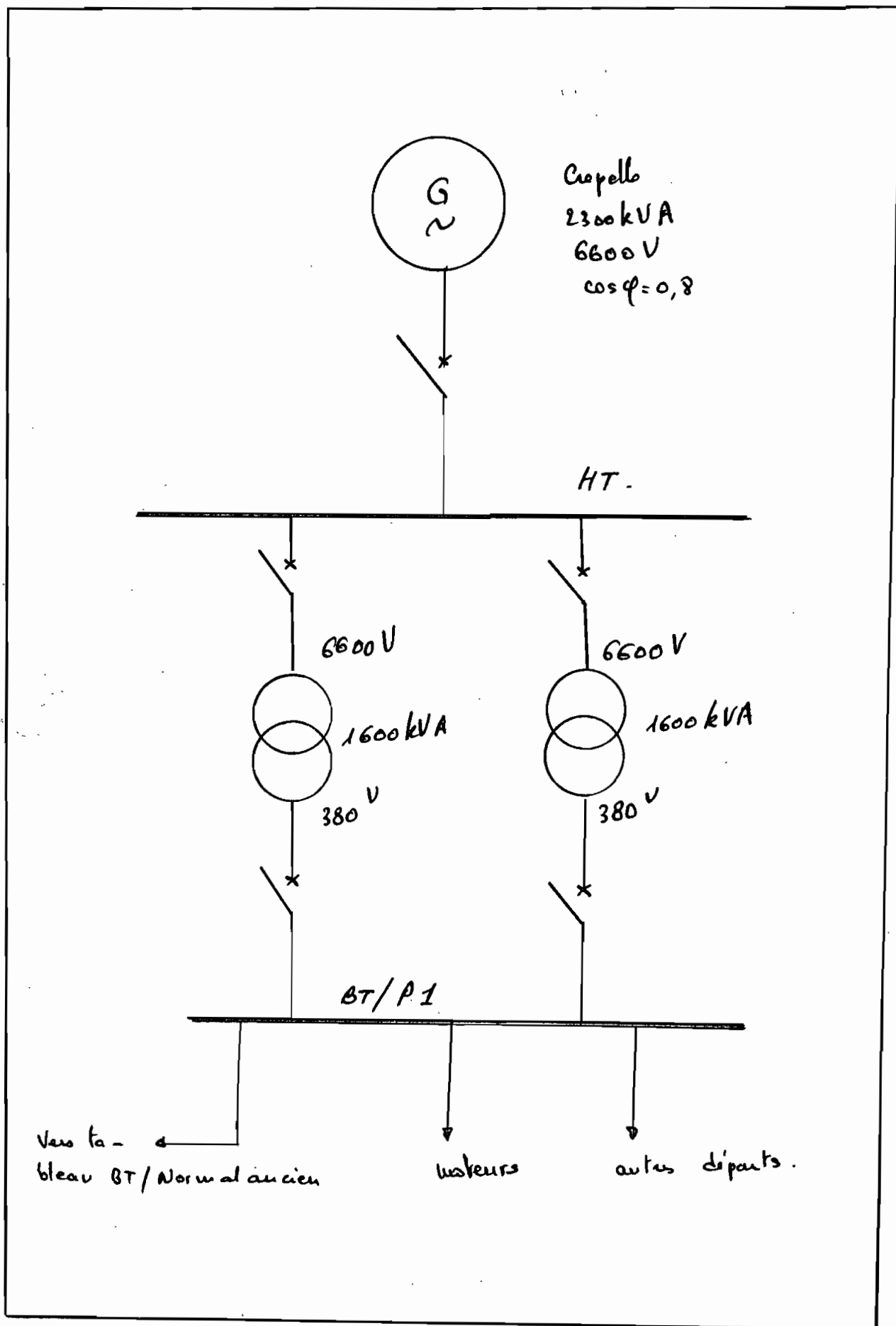


fig. 1 : solution n° 1

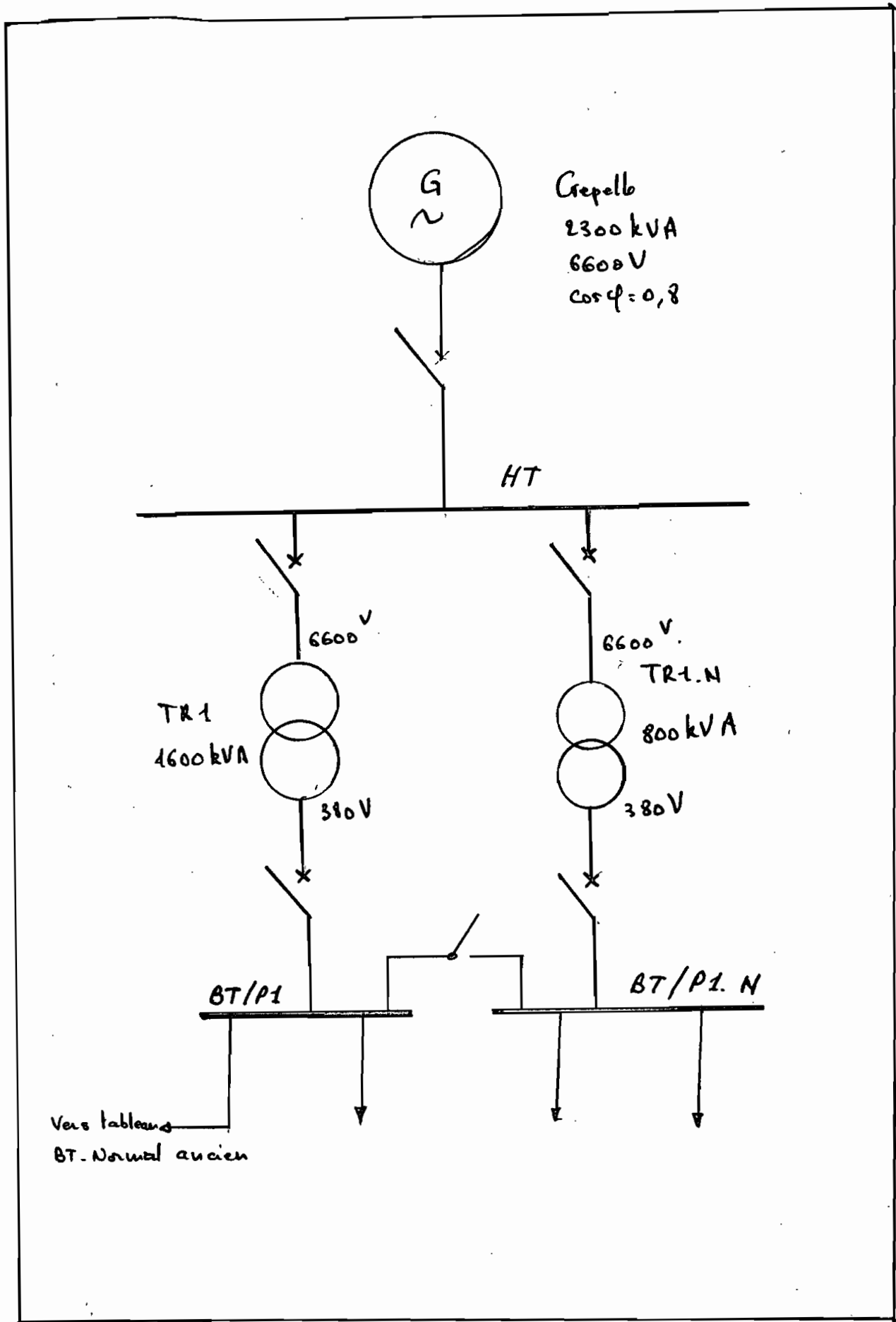


fig. n° 2 : solution n° 2

— 17 —

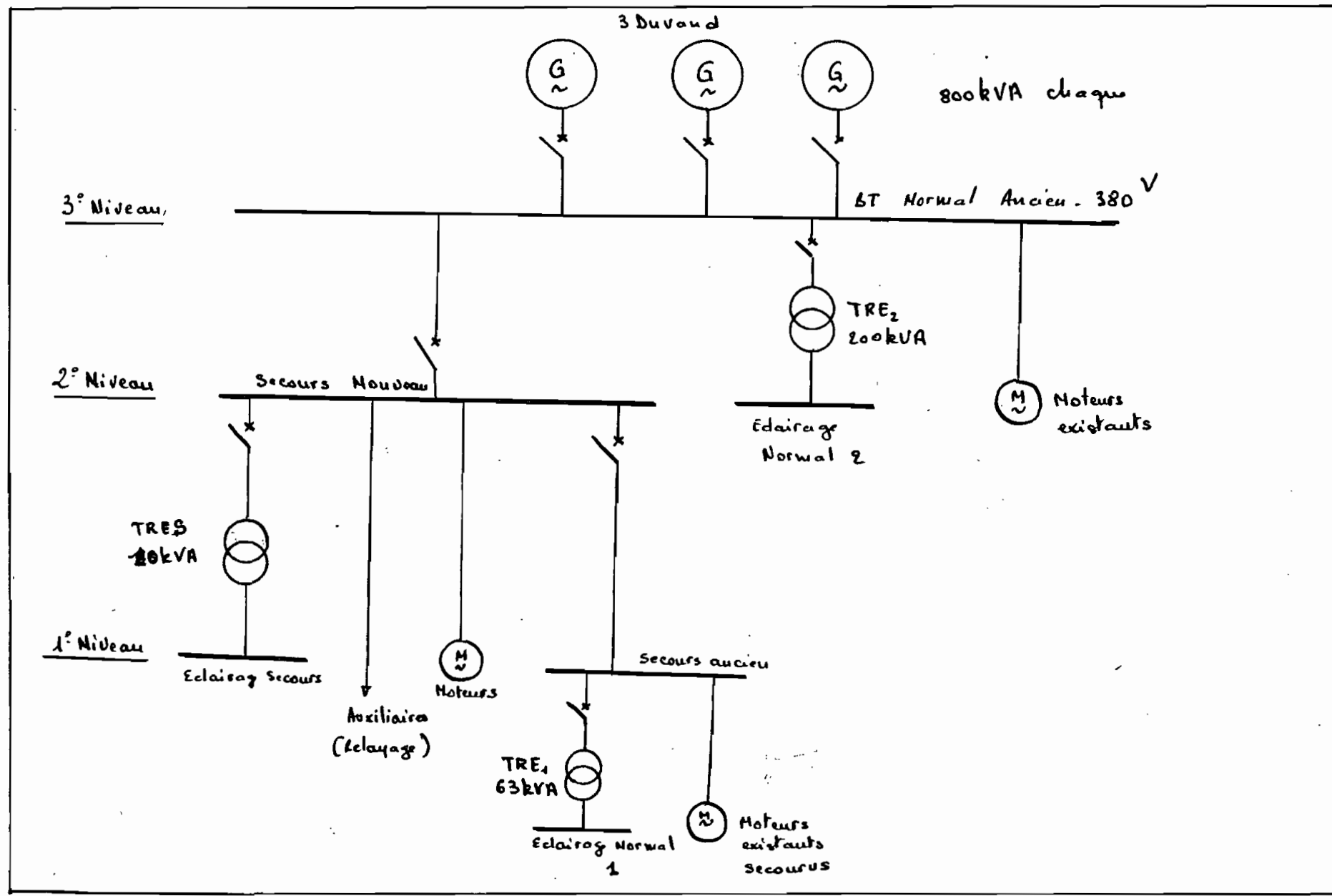
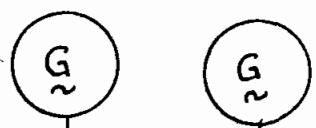


fig. 3 : schéma unifilaire de "l'installation côté Duvand"

2 Crepelle .

2300 kVA chaque .



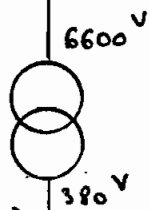
HT - 6600 V

3^e Niveau

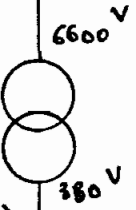


2^e Niveau

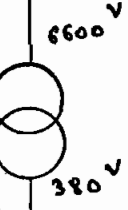
TR-1
1600kVA



TR-11
630kVA



TR-12
250kVA



BT/P1

BT/P11

BT/P12

1^e Niveau



Moteurs Extension
unités 100-200-300-500



Moteurs
Unité 800

Eclairage
PC⁺



Moteurs
unité 400

Eclairage
PC⁺



GM101 A
175kW



GM101 B
175kW

fig. 4 : schéma unifilaire de "l'installation côté Crepelle"

Tableau 1 Bilan de Puissance

Installation cote' Duvaud

Utilisation	P_n [kW]	η (%)	P_a [kW]	$K_{u,max}$	$P_{u,max}$ [kW]	K_{s_1}	P_{u_1} [kW]	K_{s_2}	P_{u_2} [kW]
Moteurs Tableau BT. Normal Ancien									
G 107 A	40,5	92	44	0,8	35,2		35,2		
G 107 B	40,5	92	44	0,8	35,2		35,2		
G 107 C	30	90	33	0,8	26,4		26,4		
I 301	55	92	60	0,8	48		48		
G 105	29	90	32,2	0,8	25,8		25,8		
G 104	5,3	84	6,3	0,8	5		5		
K 303	8	86	9,3	0,8	7,4	1	7,4	1	
G 109	4	83	4,8	0,8	3,8		3,8		
G 114	0,55	70	0,79	0,8	0,6		0,6		
G 106	22,8	90	25,3	0,8	20,2		20,2		
G 304	2,5	80	3,1	0,8	2,5		2,5		
K 203	8,7	86	10,1	0,8	8,1		8,1		
V 202	7,5	86	8,7	0,8	7		7		
G 205	4	83	4,8	0,8	3,8		3,8		
G 501 B	94	92	102	0,8	81,6		81,6		
G 101 C	170	93	183	0,8	146		146		

Tableau 1 (Suite)

Utilisation	P_n [kW]	η (%)	P_a [kW]	$K_{u_{max}}$	$P_{u_{max}}$ [kW]	K_{s_1}	P_{u_1} [kW]	K_{s_2}	P_{u_2} [kW]
K301	34	91	37,4	0,8	30		30		
G305 A	95	93	102	0,8	82		82		
G305 B	95	93	102	0,8	82		82		
G122	22	89	24,7	0,8	20		20		
G127	5,5	84	6,6	0,8	5,3		5,3		
G502 A	40,5	92	44	0,8	35,2		35,2		
G501	5,5	84	6,6	0,8	5,3		5,3		
Atelier. Magasin	34	91	37,4	0,8	30	1	30	1	
G504 C	55	92	60	0,8	48		48		
G504 A	61	92	66,3	0,8	53		53		
G504 B	61	92	66,3	0,8	53		53		
G503 A	79	92	86	0,8	69		69		
G503 B	79	92	86	0,8	69		69		
G204	0,25	70	0,36	0,8	0,29		0,29		
G505 A	5,3	84	6,3	0,8	5		5		
G505 B	5,3	84	6,3	0,8	5		5		
G503 C	190	93	204	0,8	163		163		
G201 B	75	92	82	0,8	66		66		

Tableau 1 (suite)

Utilisation	P_n [kW]	η (%)	P_a [kW]	$K_{u_{max}}$	$P_{u_{max}}$ [kW]	K_{s_1}	P_{u_1} [kW]	K_{s_2}	P_{u_2} [kW]
GM120 A	132	93	142	0,8	114		114		
GM120 B	132	93	142	0,8	114		114		
G506	16	86	18,6	0,8	15		15		
G507	5,3	84	6,3	0,8	5		5		
G508	5,9	84	7	0,8	5,6		5,6		
M401	12,2	86	14,2	0,8	11,4		11,4		
M402	12,2	86	14,2	0,8	11,4	1	11,4	1	
M403	12,2	86	14,2	0,8	11,4		11,4		
M404	12,2	86	14,2	0,8	11,4		11,4		
M405	11	86	12,8	0,8	10,2		10,2		
G402	40,5	92	44	0,8	35,2		35,2		
G403	15	87	17,2	0,8	13,8		13,8		
G110 A	0,25	70	0,36	0,8	0,28		0,28		
G110 B	0,25	70	0,36	0,8	0,28		0,28		
G112	0,52	70	0,74	0,8	0,6		0,6		
G113	0,37	70	0,53	0,8	0,4		0,4		
<u>Total</u>	1873						1762		1762

Tableau 1 (Suite)

Utilisation	P_n [kW]	η (%)	P_a [kW]	$K_{u, \max}$	$P_{u, \max}$ [kW]	K_{s_1}	P_{u_1} [kW]	K_{s_2}	P_{u_2} [kW]
<u>Jeu de Barres</u>									
<u>Secours</u>									
<u>Nouveau (BTS/P1)</u>									
GM241 A	5,5	84	6,6	0,8	5,3				
GM241 B	5,5	84	6,6	0,8	5,3				
GM243	0,75	72	0,8	0,8	0,64				
GM341 A	37	91	40,7	0,8	32,6				
GM341 B	37	91	40,7	0,8	32,6	1	115,3		
GM342 A	11	86	12,8	0,8	10,2				
GM342 B	11	86	12,8	0,8	10,2				
GM242	1,5	76	2	0,8	1,6				
GM343 C	11	86	12,8	0,8	10,2				
VM341	7,5	86	8,7	0,8	7			0,6	139
<u>Auxiliaires</u>									
J341.3342	20	90	22,2	0,8	18	1	18		
<u>Eclairage</u>									
<u>Secours</u>									
<u>Secours Ancien:</u>									
G308 A	2,3	80	2,9	0,8	2,3				
G308 B	2,3	80	2,9	0,8	2,3				
G606	9,6	86	12	0,8	9,6				
G401	23	89	26	0,8	21	0,7	92		
G604	18,4	89	20,7	0,8	16,6				
K302	34	90	37,8	0,8	30,2				
K304	9	85	10,6	0,8	8,5				
TRÉ ₁	50	98	51	0,8	41				
<u>Eclairage Normal 2</u>									
	160	98	163,3	0,8	131	1	131	0,8	105

Tableau 2 Bilan de Puissance
Installation Côte Crepelle.

Utilisation	P_n [kW]	η (%)	P_a [kW]	$K_{u_{max}}$	$P_{u_{max}}$ [kW]	K_{s_1}	P_{u_1} [kW]	K_{s_2}	P_{u_2} [kW]
<u>Jeu de</u> <u>Barres</u>									
<u>BT/P1</u>									
PC. 89V	40	100	40	0,8	32				
EM 141 A	22	89	24,7	0,8	20				
EM 141 B	22	89	24,7	0,8	20				
EM 145	30	90	33,4	0,8	26,4				
GM 102 AN	37	91	40,7	0,8	32,6				
GM 102 BN	37	91	40,7	0,8	32,6				
GM 103 N	22	89	24,7	0,8	20				
GM 108 N	22	89	24,7	0,8	20				
GM 141	15	87	17,2	0,8	13,8				
GM 142	15	87	17,2	0,8	13,8				
GM 143	55	92	59,8	0,8	47,8				
GM 145	15	87	17,2	0,8	13,8				
GM 146 A	45	91	49,5	0,8	39,6				
GM 146 B	45	91	49,5	0,8	39,6				
GM 147	2,2	79	2,8	0,8	2,2				
GM 201 NA	55	92	59,8	0,8	47,8				
GM 202 NB	45	91	49,5	0,8	39,6				
Rechauffage K 243	4	100	4	0,8	3,2				
GM 342 B	11	86	12,8	0,8	10,2				
GM 343 A	11	86	12,8	0,8	10,2				
DAM 344	0,37	70	0,53	0,8	0,4				
DAM 351	0,37	70	0,53	0,8	0,4				
GM 301	10	86	11,6	0,8	9,3				
TAM S15	4	83	4,8	0,8	3,8				
EM 142	30	90	33,4	0,8	26,7				
EM 144	30	90	33,4	0,8	26,7				
EM 152	30	90	33,4	0,8	26,7				
EM 148	22	89	24,8	0,8	19,8				
EM 149	22	89	24,8	0,8	19,8				
GM 343 A	0,75	72	1	0,8	0,8				
GM 343 B	0,75	72	1	0,8	0,8				
GM 343 C	0,75	72	1	0,8	0,8				
GM 343 D	0,75	72	1	0,8	0,8				
GM 201 B	75	92	81,5	0,8	65,2				
GM 304 N	3	79	3,8	0,8	3				
Auxiliaires J341. J342	160	93	172	0,8	137,6				
							8278	0,6	497

Tableau 2 (suite)

Utilisation	P_n [kW]	η (%)	P_m [kW]	$K_{u,max}$	$P_{u,max}$ [kW]	K_s	P_{u_1} [kW]	K_{s_2}	P_{u_2} [kW]
<u>Jeu de Barres</u>									
<u>BT. P11</u>									
GM 801	11	86	12,8	0,8	10,2	0,7	93,8	0,6	89
GM 802	1,1	76	1,5	0,8	1,2				
GM 803	30	90	33	0,8	26,4				
GM 804	0,75	72	1	0,8	0,8				
GM 805	7,5	86	8,7	0,8	7				
GM 806	37	91	40,7	0,8	32,6				
GM 807	1,5	76	2	0,8	1,6				
GM 801A	7,5	86	8,7	0,8	7				
GM 802B	7,5	86	8,7	0,8	7				
PC soudure Merox	40	1	40	0,8	32	1	32		
Precipitateur D806	6	1	6	0,8	4,8	1	4,8		
TRE 11	20	96	21	0,8	16,8	1	16,8		
<u>Jeu de Barres</u>									
<u>BT. P12</u>									
TAM 406 A	30	90	33	0,8	26,4	0,7	111	0,7	83
TAM 406 B	30	90	33	0,8	26,4				
TAM 406 C	30	90	33	0,8	26,4				
TAM 407 A	30	90	33	0,8	26,4				
TAM 407 B	30	90	33	0,8	26,4				
TAM 407 C	30	90	33	0,8	26,4				
TRE 12	8	96	8,3	0,8	6,7	1	6,7		
GM 101A	175	93	188	0,8	150	1	150	1	150

Chapitre III : Calcul des courants de court-circuit et vérification des protections.

III.1 Calcul des courants de court-circuit.

Le courant de court-circuit n'étant limité que par les impédances entre les sources et le point de défaut, sa détermination requiert préalablement celle de ces impédances.

La méthode de calcul utilisée est celle des impédances relatives qu'on rappellera par l'indice "p.u." (De l'anglais per unit system).

La méthode consiste à choisir parmi les quatre grandeurs électriques, tension de ligne U , intensité de ligne I , impédance de phase Z et puissance apparente S , deux grandeurs de base et à déterminer les deux autres de base à l'aide des relations usuelles.

Nous choisissons comme grandeurs de base la puissance apparente et la tension de ligne. Soient $S_B = 1000 \text{ kVA}$ et chaque niveau de tension respectif (moyenne tension 6600 V et basse tension 380 V) comme tension de base U_B . Ainsi

$$\text{en MT } 6600 \text{ V} \quad , \quad U_B = 6600 \text{ V}$$

$$\text{en BT } 380 \text{ V} \quad , \quad U_B = 380 \text{ V}$$

L'impédance de phase de base Z_B et le courant de phase de base I_B seront données par les formules :

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot U_B} \quad , \quad Z_B = \frac{U_B}{\sqrt{3} \cdot I_B}$$

Connaissant les grandeurs de base on calcule les grandeurs relatives correspondantes suivant la relation générale :

$$\text{grandeur relative} = \frac{\text{grandeur réelle}}{\text{grandeur de même nature prise comme base}}$$

Dans la suite cette relation sera surtout utilisée pour déterminer les impédances relatives des câbles et les tensions relatives. Les impédances relatives des éléments actifs tels que réseau, amont, transformateurs, moteurs, alternateurs etc... seront calculées selon la relation plus commode :

$$Z_{pu} = \frac{S_B}{P_{cc}} \quad \text{ou} \quad Z_{pu} : \text{impédance relative de l'élément.}$$

$$P_{cc} : \text{Puissance de court-circuit de l'élément en kVA} = \frac{P_n}{e} \quad \text{avec}$$

P_n : puissance nominal de l'élément en kVA

e : tension de court-circuit exprimée en % pour les transfos et réactances subtransitoires pour les moteurs et alternateurs toujours exprimés en %.

S_B : puissance apparente de base (fixée à 1000 kVA).

Pour ce qui de la tension relative U_{pu} , elle sera égale à 1, quel que soit le niveau de tension. En effet,

$$\text{en MT, } 6600 \text{ V} \quad U_{pu} = \frac{U}{U_B} = \frac{6600}{6600} = 1.$$

$$\text{en BT, } 380 \text{ V} \quad U_{pu} = \frac{U}{U_B} = \frac{380}{380} = 1.$$

Enfin le courant de court-circuit, bouclonné stationnaire en un point sera donné par :

$$I_{cc} = \frac{U_{pu}}{Z_{puT}} \cdot I_B.$$

où

U_{pu} : tension relative existant au point de défaut avant court-circuit. Nous venons de voir qu'elle est égale à l'unité.

Z_{puT} : impédance relative totale entre sources et le point où l'on calcule le défaut. Cette impédance inclut les sources.

I_B : courant de base. Il dépend du niveau de tension au point où l'on calcule le courant de court-circuit.

III. 1.1 Calcul de I_B .

$$\text{en MT: } U_b = 6600 \text{ V} = 6,600 \text{ kV}$$

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3} U_B} = \frac{1000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 6,6 \text{ kV}} = 87,477 \text{ A.}$$

- en BT : $U_B = 380 \text{ V} = 0,380 \text{ kV}$

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3} U_B} = \frac{1000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 0,380 \text{ kV}} = 1519,343 \text{ A}$$

III. 1.2 Calcul de Z_B

$$Z_B = \frac{U_B}{\sqrt{3} \cdot I_B}$$

- en MT : $U_B = 6600 \text{ V}$, $I_B = 87,477 \text{ A}$

$$Z_B = \frac{6600}{\sqrt{3} \cdot 87,477} = 43,560 \Omega$$

- en BT : $U_B = 380 \text{ V}$, $I_B = 1519,343 \text{ A}$

$$Z_B = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 1519,343} = 0,144 \Omega$$

III. 1.3 Calcul des impédances relatives des éléments

Sources, Transformateurs et moteurs.

- Source Juvand : $P_n = 800 \text{ kVA}$

Reactance subtransitoire $X'' = 15\%$

(valeur estimée)

$$Z_{pu} = \frac{S_B}{P_n} \times X''$$

$$Z_{pu} = \frac{1000}{800} \times \frac{15}{100} = 0,188$$

- Source Crepelle : $P_n = 2300 \text{ kVA}$ $X'' = 14,5\%$

$$Z_{pu} = \frac{1000}{2300} \times \frac{14,5}{100} = 0,063$$

- Transfo TRES : $P_n = 10 \text{ kVA}$,

Tension de court-circuit $U_{cc} = 4\%$

(selon Merlin Gerin)

$$Z_{pu} = \frac{S_B}{P_n} \times U_{cc} = \frac{1000}{10} \times \frac{4}{100} = 4$$

- Transfo TRE₁ : $P_n = 63 \text{ kVA}$, $U_{cc} = 4\%$ (Merlin Gerin)

$$Z_{pu} = \frac{1000}{63} \times \frac{4}{100} = 0,635$$

- Transfo TRE₂ : $P_n = 200 \text{ kVA}$ $U_{cc} = 4\%$

$$Z_{pu} = \frac{1000}{200} \times \frac{4}{100} = 0,2$$

- Transfo TR1 : $P_n = 1600 \text{ kVA}$ $U_{cc} = 6\%$

$$Z_{pu} = \frac{1000}{1600} \times \frac{6}{100} = 0,038$$

- Transfo TR11 : $P_n = 630 \text{ kVA}$ $U_{cc} = 4\%$

$$Z_{pu} = \frac{1000}{630} \times \frac{4}{100} = 0,064$$

- Transfo TR12 : $P_n = 250 \text{ kVA}$ $U_{cc} = 4\%$

$$Z_{pu} = \frac{1000}{250} \times \frac{4}{100} = 0,16$$

- Transfo TRE11 : $P_n = 25 \text{ kVA}$ $U_{cc} = 4\%$

$$Z_{pu} = \frac{1000}{25} \times \frac{4}{100} = 1,6$$

- Transfo TRE12 : $P_n = 10 \text{ kVA}$ $U_{cc} = 4\%$

$$Z_{pu} = \frac{1000}{10} \times \frac{4}{100} = 4$$

- Moteurs asynchrones.

Un moteur asynchrone brusquement désalimenté (c'est-à-dire $U=0$) se comporte comme un générateur pendant une courte durée. Ainsi en cas de faute aux bornes du moteur il contribue au courant de court-circuit.

Dans la suite nous considérerons que la contribution des moteurs de puissance inférieure à 40 kW est négligeable.

L'impédance relative d'un moteur est donnée par la même formule

$$Z_{pv} = \frac{S_B}{P} \cdot X'' \quad \text{où}$$

S_B : puissance de base choisie (1000 kVA)

P : puissance électrique nominale du moteur exprimée en kVA = $\frac{P_n}{\eta \cdot \cos \varphi}$ avec P_n : puis-

sance mécanique en kW (indiquée sur plaque signalétique)

η : rendement nominal du moteur

$\cos \varphi$: facteur de puissance nominal du moteur.

X'' : réactance subtransitoire du moteur = $\frac{I_n}{I_d}$

I_n : courant nominal ; I_d : courant de démarrage. Sauf indications contraires on prendra $I_d = 6 I_n$ d'où $X'' \approx 17\%$.

Ainsi on peut écrire pour un moteur :

$$Z_{pu} = \frac{S_g \cdot \eta \cdot \cos \varphi \cdot x''}{100 P_n}$$

et on estimera $\eta \approx 90\%$ à défaut des rendements nominaux.

Enfin les impédances relatives des moteurs, d'au moins 40 kW alimentés par le même jeu de barres seront représentées par leur impédance relative équivalente parallèle dont le calcul est fait dans le tableau suivant (tableau n° 3)

Tableau 3 Détermination des impédances relatives des moteurs pouvant contribuer au courant de court-circuit

Designation	P_n [kW]	$\cos \varphi$	η	Z_{pu}	Z_{pu}^{-1}
<u>BT Normal Ancien</u>					
G 107 A	40,5	0,91	0,90	3,438	0,291
I 301	55	0,89	0,90	2,476	0,404
G 107 B	40,5	0,91	0,90	3,438	0,291
G 501 B	94	0,925	0,90	1,505	0,664
G 101 C	170	0,90	0,90	0,81	1,234
G 502 A	40,5	0,91	0,90	3,438	0,291
G 402	40,5	0,85	0,90	3,211	0,311
G 504 A	61	0,92	0,90	2,308	0,433
G 504 B	61	0,92	0,90	2,308	0,433
G 504 C	55	0,90	0,90	2,504	0,399
G 503 A	79	0,925	0,90	1,791	0,558
G 503 B	79	0,925	0,90	1,791	0,558
G 503 C	190	0,86	0,90	0,693	1,443
G 201 B	75	0,89	0,90	1,816	0,551
GM 120 A	132	0,89	0,90	1,032	0,969
GM 120 B	132	0,89	0,90	1,032	0,969
G 305 A	95	0,90	0,90	1,449	0,690

Tableau 3 (suite)

Designation	P_n [kw]	cos ϕ	η	Z_{pu}	Z_{pu}^{-1}
G 305 B	95	0,90	0,90	1,449	0,690
Total :				0,089 ←	11,179
<u>BT / P1.</u>					
GM 143	55	0,89	0,90	2,476	0,404
GM 146 A	45	0,89	0,90	3,026	0,330
GM 146 B	45	0,89	0,90	3,026	0,330
GM 201 NA	55	0,89	0,90	2,476	0,404
GM 202 NA	45	0,89	0,90	3,026	0,330
GM 202 NB	45	0,89	0,90	3,026	0,330
GM 201 B	75	0,89	0,90	1,816	0,551
Total				0,373 ←	2,679
<u>HT :</u>					
GM 101 B	175	0,88	0,90	0,646	1,548

Cables.

d'impédance relative d'une phase de câble et donnée par

$$Z_{pu} = \frac{Z}{Z_B} \text{, où}$$

Z_B : impédance de base

$$Z_B = 43,560 \Omega \text{ en } 6600V$$

$$Z_B = 0,144 \Omega \text{ en } 380V.$$

Z : impédance réelle d'une phase de câble

$$= \sqrt{R^2 + X^2} \text{, où}$$

R = résistance d'une phase = $\rho l/s$

X : réactance d'une phase = $0,15067 S^{-0,10113} \cdot l$

avec ρ : résistivité du matériau constituant le câble en $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$.

$$\rho = 22,5 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km} \text{ pour le cuivre}$$

$$\rho = 36 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km} \text{ pour l'aluminium.}$$

l : longueur du câble en km.

s : section d'une phase en mm^2

R et X en Ω .

Les résultats de ces calculs sont consignés dans le tableau 4 pour les câbles dont les caractéristiques sont connues.

I. 3. 3. Jeux de barres, Disjoncteurs et fusibles

$$Z_{pu} \approx 0.$$

Tableau 4 Impédances relatives des câbles.

Designation	Matériau	longueur, l [km]	section, S [mm ²]	Résistance R [Ω]	Reactance X [Ω]	Impédance Z [Ω]	Impédance de base Z_b [Ω]	Impédance relative Z_{pu}
Cable C_1	Aluminium	0,013	240	$1,95 \cdot 10^{-3}$	$1,12 \cdot 10^{-3}$	$2,249 \cdot 10^{-3}$	43,560	$5,160 \cdot 10^{-5}$
Cable C_2	Cuivre	0,170	16	0,239	$1,94 \cdot 10^{-2}$	0,240	43,560	$5,51 \cdot 10^{-3}$
Cable C_3	Cuivre	0,004	480	$1,875 \cdot 10^{-4}$	$3,24 \cdot 10^{-4}$	$3,743 \cdot 10^{-4}$	0,144	$2,60 \cdot 10^{-3}$
Cable C_4	Cuivre	0,65	16	0,914	$7,41 \cdot 10^{-2}$	0,917	43,560	0,021
Cable C_5	Cuivre	0,004	150	$6 \cdot 10^{-4}$	$3,64 \cdot 10^{-4}$	$7,018 \cdot 10^{-4}$	0,144	$4,87 \cdot 10^{-3}$
Cable C_6	Cuivre	0,25	16	0,366	$2,85 \cdot 10^{-2}$	0,367	43,560	$8,425 \cdot 10^{-3}$
Cable C_7	Aluminium	0,012	150	$2,88 \cdot 10^{-3}$	$1,092 \cdot 10^{-3}$	$3,080 \cdot 10^{-3}$	43,560	$7,071 \cdot 10^{-5}$
Cable C_8	Cuivre	0,023	1800	$2,875 \cdot 10^{-4}$	$1,63 \cdot 10^{-3}$	$1,652 \cdot 10^{-3}$	0,144	0,0115
Cable C_9	Cuivre	0,020	480	$9,375 \cdot 10^{-4}$	$1,62 \cdot 10^{-3}$	$1,872 \cdot 10^{-3}$	0,144	0,013
Cable C_{11}	Cuivre	0,015	240	$1,406 \cdot 10^{-3}$	$1,29 \cdot 10^{-3}$	$1,908 \cdot 10^{-3}$	0,144	0,013
Cable C_{12}	Cuivre	0,025	240	$2,344 \cdot 10^{-3}$	$2,15 \cdot 10^{-3}$	$3,180 \cdot 10^{-3}$	0,144	0,022

III.1.4 Schéma équivalent des impédances relatives

C'est un schéma unifilaire dans lequel les différents éléments du réseau (alternateurs, transfos, cables et moteurs) sont représentés par leur impédance relative.

Dépendamment du mode considéré (mode 1, mode 2, mode 3 ou mode 4 préalablement définis) nous obtenons les schémas des figures 5, 7, 9 et 10

Par l'utilisation des règles d'association des impédances, nous ramenons ces schémas à ceux dits simplifiés :

Partant, nous calculons le courant de court-circuit triphasé stationnaire aux différents points de faute F_i (i allant de 1 à 14) selon la formule donnée plus haut :

$$I_{cc} = \frac{U_{pv}}{Z_{pvf}} \cdot I_B \quad \text{où}$$

$$U_{pv} = 1$$

Z_{pvf} : impédance relative totale entre sources et point de défaut (à calculer)

I_B : courant de base

$$I_B = 87,477 \text{ A en } 6600 \text{ V}$$

$$I_B = 1519,343 \text{ A en } 380 \text{ V}$$

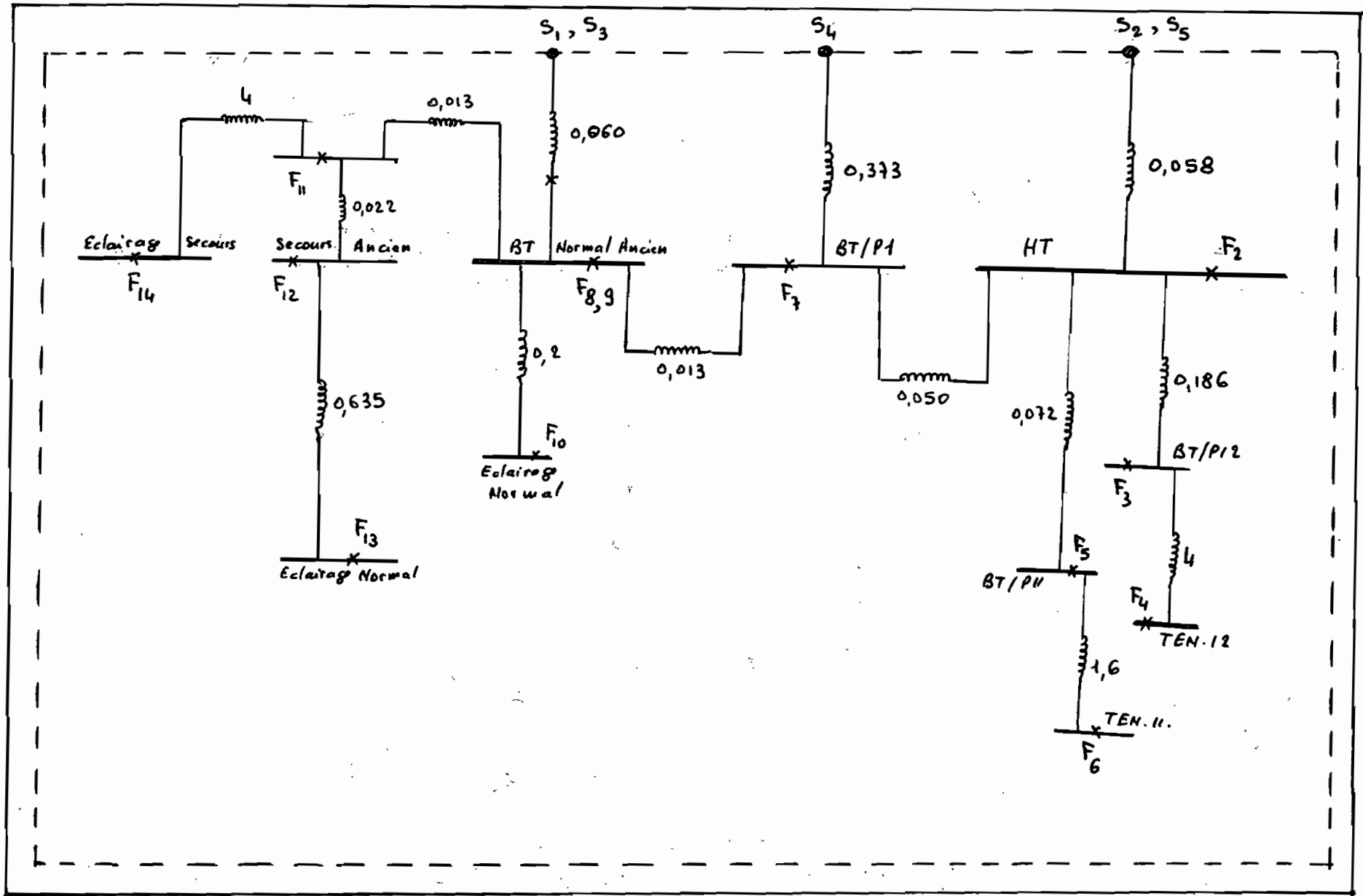


Fig 6 : schéma équivalent simplifié des impédances relatives (mode 1)

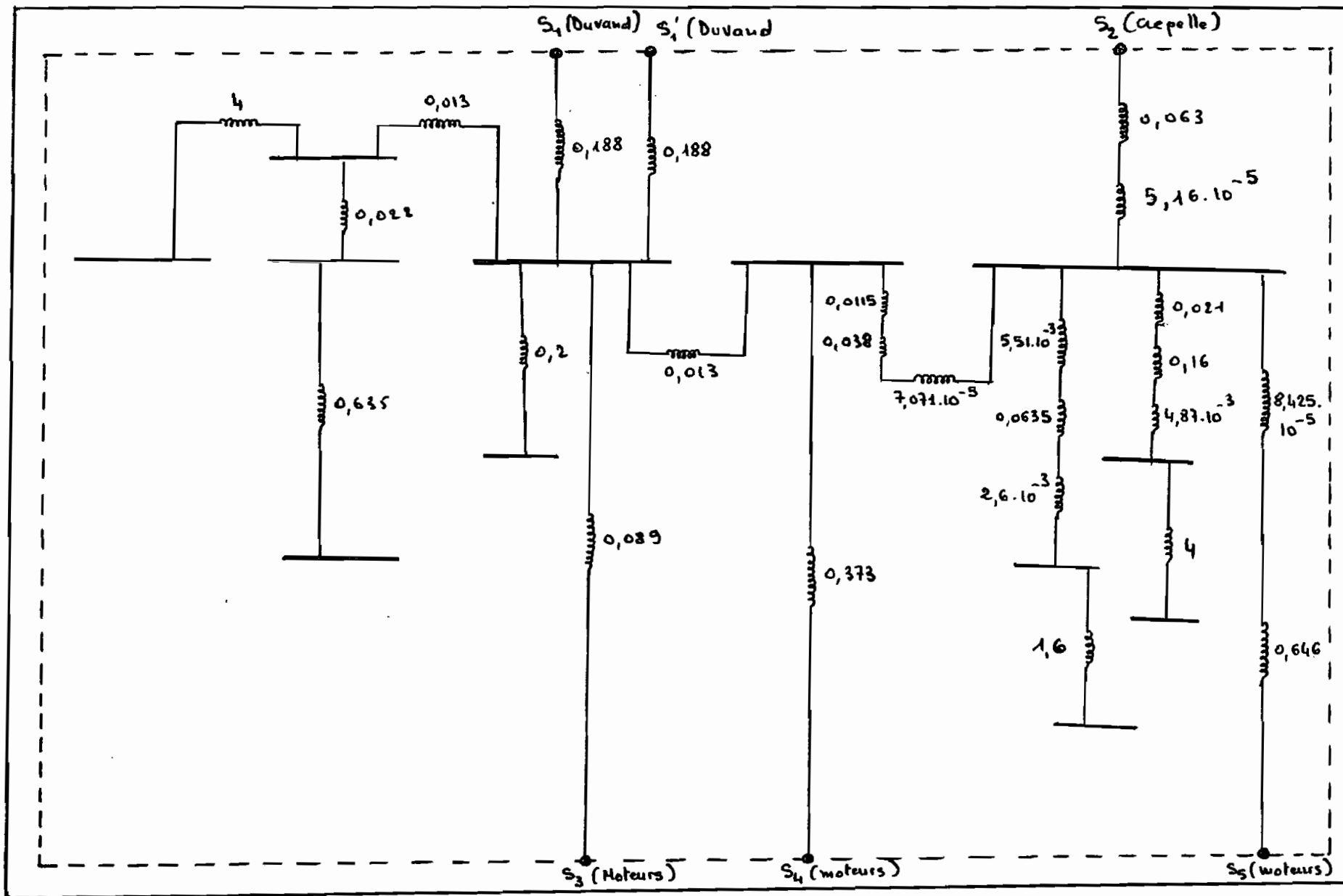


fig. 7 : schéma équivalent des impédances relatives (mode 2)

-04-

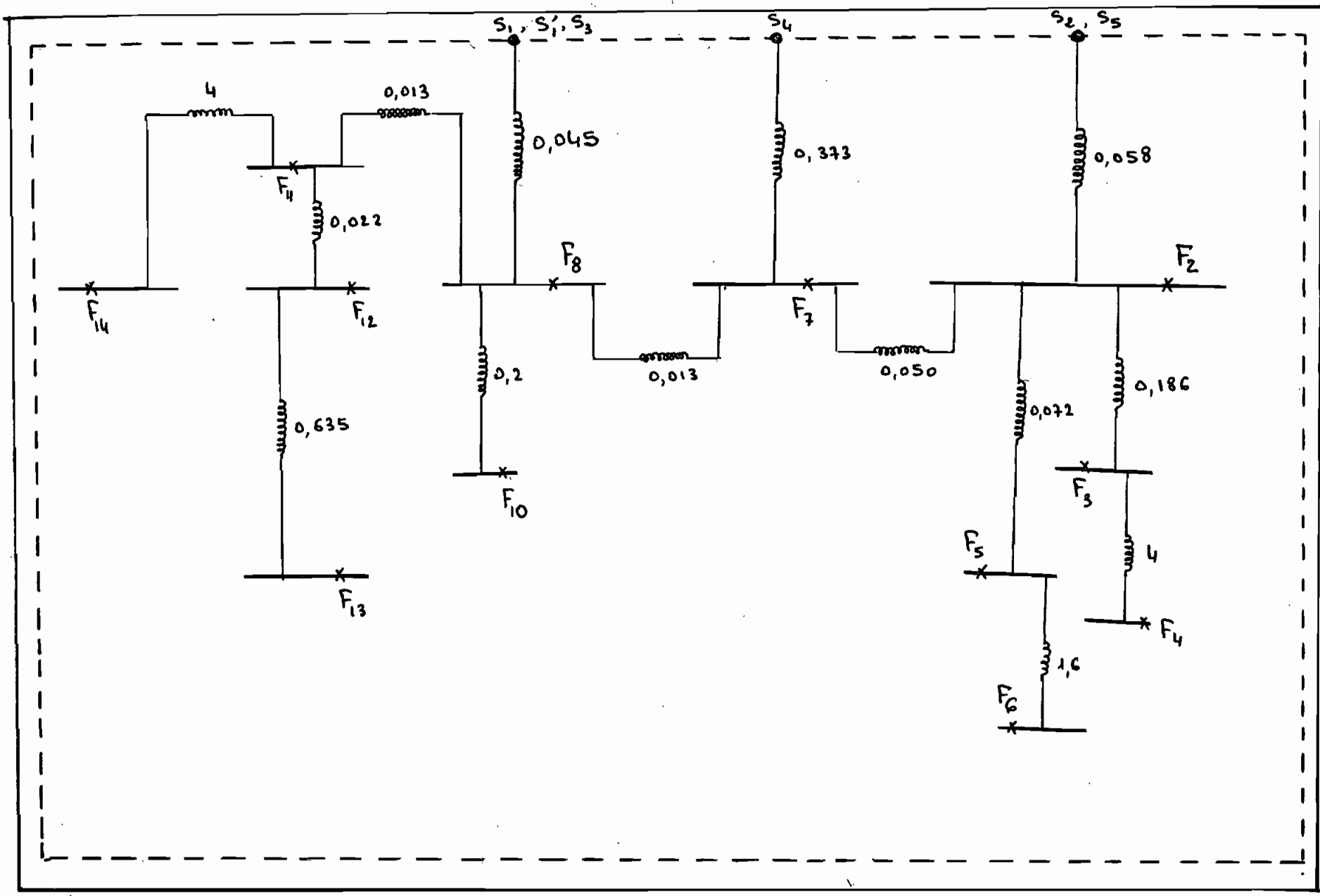


Fig 8 : schéma équivalent simplifié des impédances relatives (mode 2)

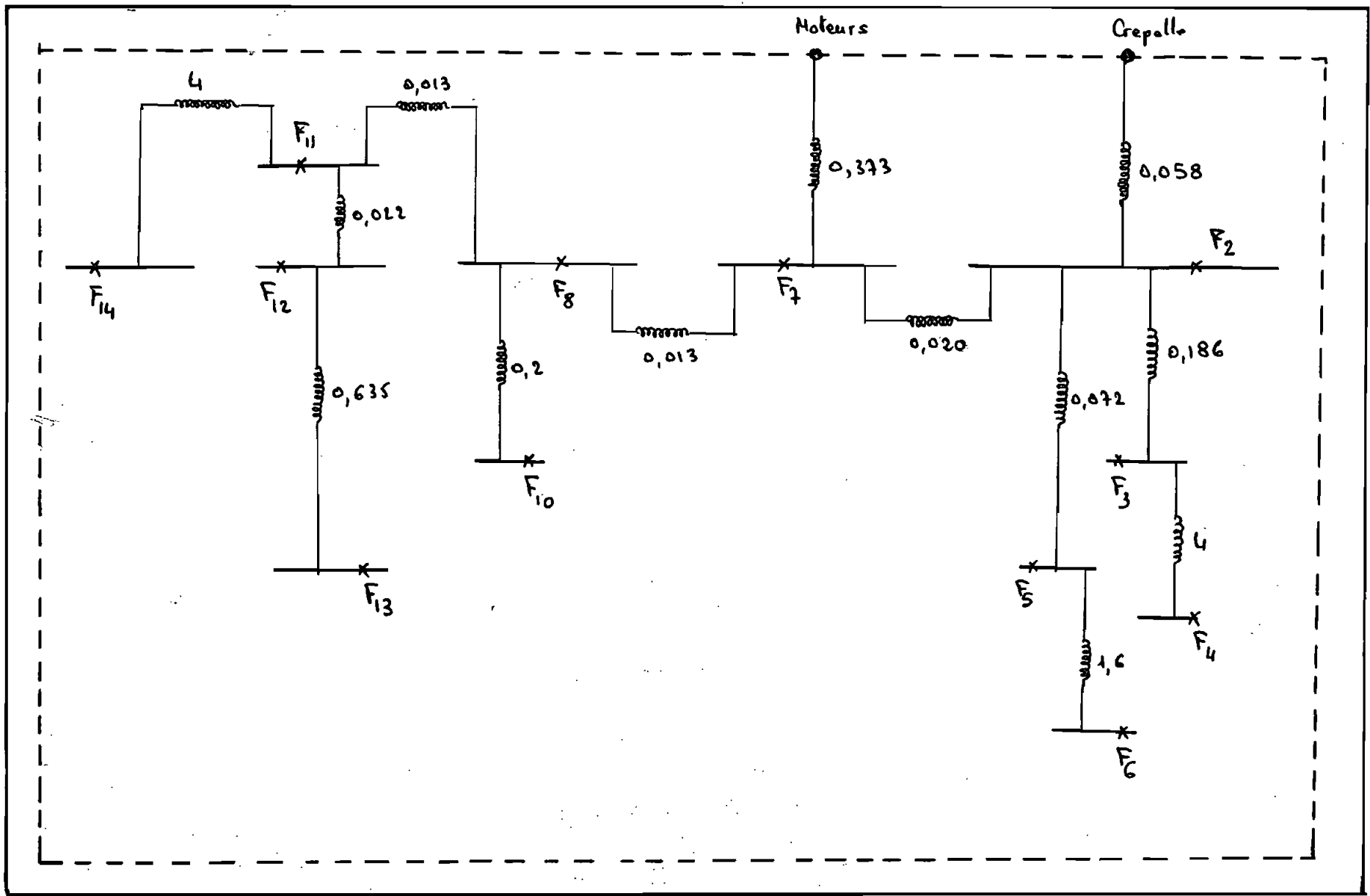


fig 9 : schéma équivalent simplifié des impédances relatives (mode 3).

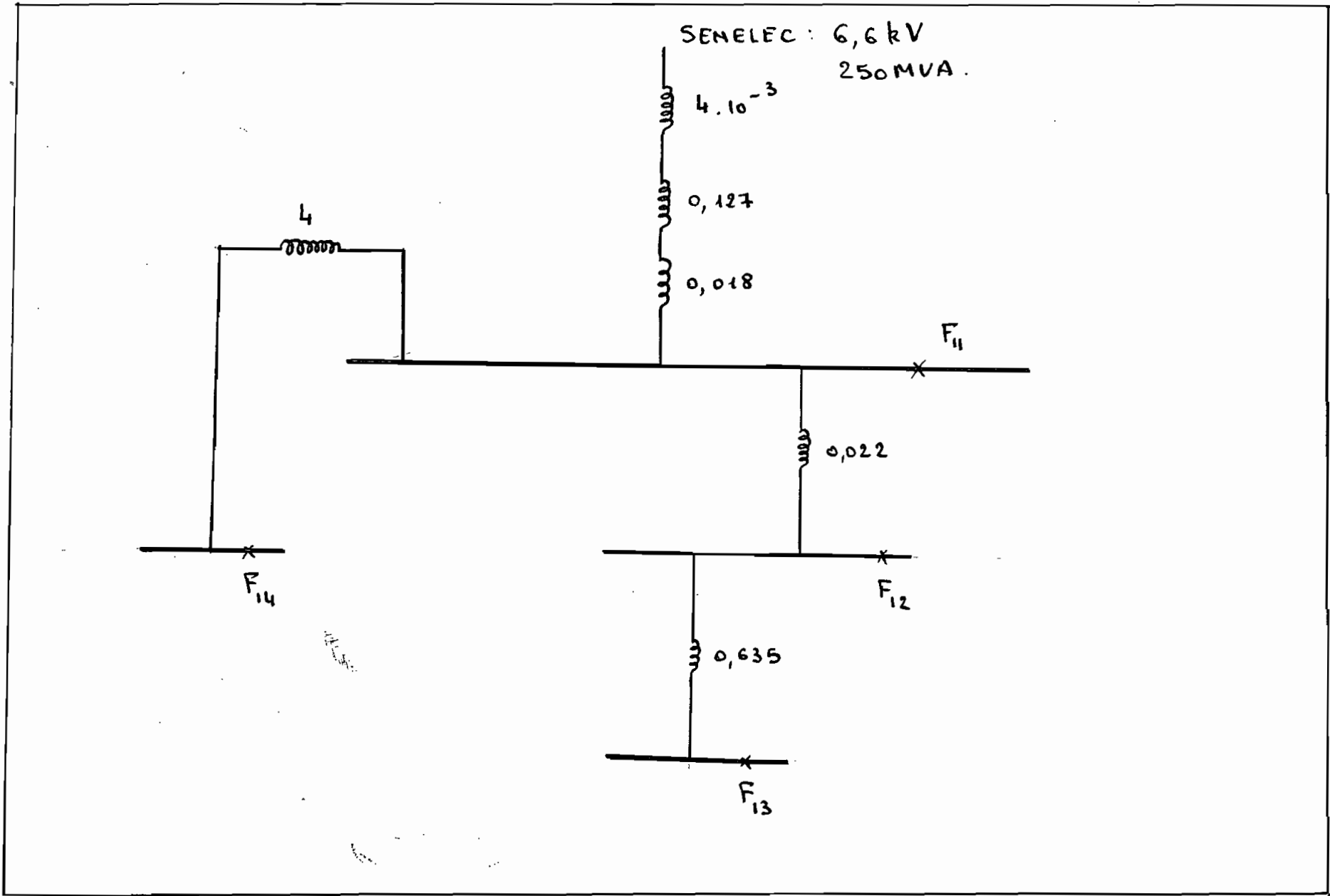


fig 10 : schéma équivalent des impédances relatives (mode 4)

III.15. Calcul de l'impédance relative résultante entre sources et points de défaut respectifs : Z_{pu_f}

La valeur de l'impédance relative à prendre en compte pour le calcul du courant de court-circuit aux différents points considérés est déterminée dans les tableaux 5, 6, 7 et 8.

(Chaque tableau comprend des colonnes d'impédances et d'admittances relatives.

Des flèches sont utilisées pour indiquer le calcul des admittances et la somme des admittances est utilisée pour déterminer la résultante des impédances en parallèle.

III.16. Calcul proprement dit du courant de court-circuit triphasé stationnaire : I_{cc}

Une fois l'impédance relative résultante Z_{pu_f} déterminée pour les différents points de faute, les courants de court-circuit correspondants se calculent suivant la relation déjà mentionnée

$$I_{cc} = \frac{U_{pu}}{Z_{pu_f}} \cdot I_B = \frac{1}{Z_{pu_f}} \cdot I_B$$

Les résultats de ces calculs sont consignés dans les tableaux 9, 10, 11 et 12.

Tableau 5

Détermination des impédances relatives aux différents points de faute (mode 1)

Faute en F_1		Faute en F_2		Faute en F_3		Faute en F_4		Faute en F_5		Faute en F_6		Faute en F_7	
Z_{pu_t}	$Z_{pu_t}^{-1}$	Z_{pu_t}	$Z_{pu_t}^{-1}$	Z_{pu_t}	$Z_{pu_t}^{-1}$	Z_{pu_t}	$Z_{pu_t}^{-1}$	Z_{pu_t}	$Z_{pu_t}^{-1}$	Z_{pu_t}	$Z_{pu_t}^{-1}$	Z_{pu_t}	$Z_{pu_t}^{-1}$
0,060		0,060		0,060		0,224		0,060		0,110		0,060	
0,013		0,013		0,013		4		0,013		1,6		0,013	
<hr/>		<hr/>		<hr/>		<hr/>		<hr/>		<hr/>		<hr/>	
0,073 → 13,7		0,073 → 13,7		0,073 → 13,7		4,224		0,073 → 13,7		1,710		0,073 → 13,7	
0,373 → 2,681		0,373 → 2,681		0,373 → 2,681				0,373 → 2,681				0,373 → 2,681	
<hr/>		<hr/>		<hr/>				<hr/>				<hr/>	
0,061 ← 16,381		0,061 ← 16,381		0,061 ← 16,381				0,061 ← 16,381				0,058 —	
0,050		0,050		0,050				0,050				0,050	
<hr/>		<hr/>		<hr/>				<hr/>				<hr/>	
0,111 → 9		0,111 → 9		0,111 → 9				0,111 → 9				0,108 → 9,259	
0,654 → 1,529		0,058 → 17,24		0,058 → 17,24				0,058 → 17,24					
<hr/>		<hr/>		<hr/>				<hr/>				<hr/>	
0,095 ← 10,529		0,038 ← 26,24		0,038 ← 26,24				0,038 ← 26,24				0,039 ← 25,640	
5,16.10 ⁻⁵				0,186				0,072					
<hr/>				<hr/>				<hr/>					
0,095 → 10,529				0,224				0,110					
0,063 → 15,873													
<hr/>													
0,038 ← 26,402													

-44-

Tableau 5 (suite)

Faute en F_8		Faute en F_9		Faute en F_{10}		Faute en F_{11}		Faute en F_{12}		Faute en F_{13}		Faute en F_{14}	
Z_{pu_t}	$Z_{pu_t}^{-1}$	Z_{pu_t}	$Z_{pu_t}^{-1}$	Z_{pu_t}	$Z_{pu_t}^{-1}$	Z_{pu_t}	$Z_{pu_t}^{-1}$	Z_{pu_t}	$Z_{pu_t}^{-1}$	Z_{pu_t}	$Z_{pu_t}^{-1}$	Z_{pu_t}	$Z_{pu_t}^{-1}$
0,058													
0,050		0,037		0,037		0,037		0,050		0,072		0,050	
				0,2		0,013		0,022		0,635		4	
				<u>0,237</u>		<u>0,050</u>		<u>0,072</u>		<u>0,707</u>		<u>4,050</u>	
0,108 → 9,259													
0,373 → 2,681													
0,084 ← 11,94													
0,013													
<u>0,097</u> → 10,309													
0,060 → 16,667													
<u>0,037</u> ← 26,976													

Tableau 6 Détermination des impédances relatives aux différents points de fautes (mode 2)

Faute en F_1		Faute en F_2		Faute en F_3		Faute en F_4		Faute en F_5		Faute en F_6		Faute en F_7	
Z_{puT}	Z_{puT}^{-1}	Z_{puT}	Z_{puT}^{-1}	Z_{puT}	Z_{puT}^{-1}	Z_{puT}	Z_{puT}^{-1}	Z_{puT}	Z_{puT}^{-1}	Z_{puT}	Z_{puT}^{-1}	Z_{puT}	Z_{puT}^{-1}
0,045		0,045		0,037		0,223		0,037		0,109		0,045	
0,013		0,013		0,186		4		0,072		1,6		0,013	
<hr/>		<hr/>		<hr/>		<hr/>		<hr/>		<hr/>		<hr/>	
0,058 → 17,240		0,058 → 17,240		<u>0,223</u>		<u>4,223</u>		<u>0,109</u>		<u>1,709</u>		0,058 → 17,240	
0,373 → 2,681		0,373 → 2,681										0,373 → 2,681	
<hr/>		<hr/>											
0,050 ← 19,921		0,050 ← 19,921										0,058	
0,050		0,050										0,050	
<hr/>		<hr/>										<hr/>	
0,100 → 10		0,100 → 10										0,108 → 9,259	
0,646 → 1,548		0,058 → 17,240											
<hr/>		<hr/>										<hr/>	
0,086 ← 11,548		<u>0,037</u> ← 27,240										<u>0,034</u> ← 29,180	
5,16.10 ⁻⁵													
<hr/>													
0,086 → 11,548													
0,063 → 15,873													
<hr/>													
<u>0,036</u> ← 27,421													

-94-

Tableau 6 (suite)

Faute en F_8		Faute en F_9		Faute en F_{10}		Faute en F_{11}		Faute en F_{12}		Faute en F_{13}		Faute en F_{14}	
Z_{pu_t}	$Z_{pu_t}^{-1}$	Z_{pu_t}	$Z_{pu_t}^{-1}$	Z_{pu_t}	$Z_{pu_t}^{-1}$	Z_{pu_t}	$Z_{pu_t}^{-1}$	Z_{pu_t}	$Z_{pu_t}^{-1}$	Z_{pu_t}	$Z_{pu_t}^{-1}$	Z_{pu_t}	$Z_{pu_t}^{-1}$
0,058													
0,050		<u>0,031</u>		0,031		0,031		0,044		0,066		0,044	
<u>0,108</u>	$\rightarrow 9,259$			0,2		0,013		0,022		0,635		4	
0,373	$\rightarrow 2,681$			<u>0,231</u>		<u>0,024</u>		<u>0,066</u>		<u>0,701</u>		<u>4,044</u>	
0,084	$\leftarrow 11,940$												
0,013													
<u>0,097</u>	$\rightarrow 10,309$												
0,045	$\rightarrow 22,222$												
<u>0,031</u>	$\leftarrow 32,531$												

-47-

Tableau 7 Détermination des impédances relatives aux différents points de faute (mode 3)

Faute en F_1		Faute en F_2		Faute en F_3		Faute en F_4		Faute en F_5		Faute en F_6		Faute en F_7	
Z_{pu_t}	$Z_{pu_t}^{-1}$	Z_{pu_t}	$Z_{pu_t}^{-1}$	Z_{pu_t}	$Z_{pu_t}^{-1}$	Z_{pu_t}	$Z_{pu_t}^{-1}$	Z_{pu_t}	$Z_{pu_t}^{-1}$	Z_{pu_t}	$Z_{pu_t}^{-1}$	Z_{pu_t}	$Z_{pu_t}^{-1}$
0,373		0,373		0,051		0,237		0,051		0,123		0,058	
0,020		0,020		0,186		4		0,072		1,6		0,020	
<u>0,393</u>	$\rightarrow 2,544$	<u>0,393</u>	$\rightarrow 2,544$	<u>0,237</u>		<u>4,237</u>		<u>0,123</u>		<u>1,723</u>		<u>0,078</u>	$\rightarrow 12,820$
0,646	$\rightarrow 1,548$	0,058	$\rightarrow 17,241$									0,373	$\rightarrow 2,681$
0,244	$\leftarrow 4,092$	0,051	$\leftarrow 19,785$									<u>0,064</u>	$\leftarrow 15,501$
$5,16 \cdot 10^{-5}$													
0,244	$\rightarrow 4,092$												
0,063	$\rightarrow 15,873$												
<u>0,050</u>	$\leftarrow 19,965$												

Tableau 7 (suite)

Faute en F_8		Faute en F_9		faute en F_{10}		Faute en F_{11}		Faute en F_{12}		faute en F_{13}		Faute en F_{14}	
Z_{pu_t}	$Z_{pu_t}^{-1}$	Z_{pu_t}	$Z_{pu_t}^{-1}$	Z_{pu_t}	$Z_{pu_t}^{-1}$	Z_{pu_t}	$Z_{pu_t}^{-1}$	Z_{pu_t}	$Z_{pu_t}^{-1}$	Z_{pu_t}	$Z_{pu_t}^{-1}$	Z_{pu_t}	$Z_{pu_t}^{-1}$
0,064				0,097		0,077		0,090		0,112		0,090	
0,013		-	-	0,2		0,013		0,022		0,635		4	
<u>0,077</u>				<u>0,297</u>		<u>0,090</u>		<u>0,112</u>		<u>0,747</u>		<u>4,090</u>	

Tableau 8 Détermination des impédances relatives aux différents points de faute (mode 4)

Faute en F_{11}	Faute en F_{12}	Faute en F_{13}	Faute en F_{14}
Z_{pu_t} $Z_{pu_t}^{-1}$ $4 \cdot 10^{-3}$ $0,127$ $0,018$ <hr/> $0,149$ <hr/>	Z_{pu_t} $Z_{pu_t}^{-1}$ $0,149$ $0,022$ <hr/> $0,171$ <hr/>	Z_{pu_t} $Z_{pu_t}^{-1}$ $0,171$ $0,635$ <hr/> $0,806$ <hr/>	Z_{pu_t} $Z_{pu_t}^{-1}$ $0,149$ 4 <hr/> $4,149$ <hr/>

Tableau 9 : Valeurs des courants de court-circuit triphasés stationnaires
(Mode 1)

localisation du défaut.	Z_{pu}	I_B [A]	I_{cc} [kA]
Faute en F_1	0,038	87,477	2,302
Faute en F_2	0,038	87,477	2,302
Faute en F_3	0,224	1519,343	6,783
Faute en F_4	4,224	1519,343	0,360
Faute en F_5	0,110	1519,343	13,812
Faute en F_6	1,710	1519,343	0,888
Faute en F_7	0,039	1519,343	38,958
Faute en F_8	0,037	1519,343	41,063
Faute en F_9	0,037	1519,343	41,063
Faute en F_{10}	0,237	1519,343	6,411
Faute en F_{11}	0,050	1519,343	30,387
Faute en F_{12}	0,072	1519,343	21,102
Faute en F_{13}	0,707	1519,343	2,149
Faute en F_{14}	4,050	1519,343	0,375

Tableau 10 : Valeurs des courants de court-circuit triphasés stationnaires (Mode 2)

Localisation du défaut	$Z_{pu E}$	I_B (A)	I_{cc} (kA)
Faute en F_1	0,036	87,477	2,430
Faute en F_2	0,037	87,477	2,364
Faute en F_3	0,223	1519,343	6,813
Faute en F_4	4,223	1519,343	0,360
Faute en F_5	0,109	1519,343	13,939
Faute en F_6	1,709	1519,343	0,889
Faute en F_7	0,034	1519,343	44,686
Faute en F_8	0,031	1519,343	49,011
Faute en F_9	0,031	1519,343	49,011
Faute en F_{10}	0,231	1519,343	6,577
Faute en F_{11}	0,044	1519,343	34,530
Faute en F_{12}	0,066	1519,343	23,020
Faute en F_{13}	0,701	1519,343	2,167
Faute en F_{14}	4,044	1519,343	0,376

Tableau 11 Valeurs des courants de court-circuit triphasés stationnaires (mode 3)

Localisation du défaut	$Z_{pu\epsilon}$	$I_B [A]$	$I_{cc} [kA]$
Faute en F_1	0,050	87,477	1,749
Faute en F_2	0,051	87,477	1,715
Faute en F_3	0,237	1519,343	6,411
Faute en F_4	4,237	1519,343	0,358
Faute en F_5	0,123	1519,343	12,352
Faute en F_6	1,723	1519,343	0,882
Faute en F_7	0,064	1519,343	23,740
Faute en F_8	0,077	1519,343	19,732
Faute en F_9	-	-	-
Faute en F_{10}	0,297	1519,343	5,116
Faute en F_{11}	0,090	1519,343	16,882
Faute en F_{12}	0,112	1519,343	13,566
Faute en F_{13}	0,747	1519,343	2,034
Faute en F_{14}	4,090	1519,343	0,371.

Tableau 12 Valeurs des courants de court-circuit triphasés stationnaires (mode 4)

localisation du défaut	Z_{puT}	$I_B [A]$	$I_{cc} [kA]$
Faute en F_{11}	0,149	1519,343	10,197
Faute en F_{12}	0,171	1519,343	8,885
Faute en F_{13}	0,806	1519,343	1,885
Faute en F_{14}	4,149	1519,343	0,366

III.2. Vérification des protections

De tous les modes, actuellement utilisés (modes 1, 2, 4) le 2 est celui qui offre les conditions de court-circuit les plus sévères. Nous allons alors déterminer les caractéristiques des disjoncteurs inhérentes au court-circuit (courant de réglage du magnétique I_{rm} , pouvoir de coupure Pdc et pouvoir de fermeture Pdf) selon le mode 2 ainsi que le mode 3 qui n'a pas encore vu le jour. Leur courants nominaux, I_n , seront par contre donnés pour chaque mode.

Cette étude sera restreinte aux circuits des figures 11, 12 et 14 pour les modes 1, 2 et 3 respectivement.

Cependant pour le calcul du Pdf qui requiert la détermination préalable du rapport R/X , nous considérons tout le réseau alimenté par les groupes car R et X sont des grandeurs résultantes dont le calcul, fait avec la méthode qui va suivre, nécessite la résistance et la réactance de l'ensemble des éléments du réseau.

En résumé, compte tenu de la restriction précitée, seuls les disjoncteurs D_1 (HT1Q1), D_7 , D_8 (BTQ2), D_9 (BTQ3), D_{10} , D_{11} , D_{12} , D_{13} et D_{14} seront vérifiés.

Par ailleurs, il convient de noter qu'à première vue on peut être tenter de dire que le réseau, étant alimenté en boucle, doit requérir à l'extrémité de chaque

trousson un disjoncteur muni d'un relais directionnel pour assurer la protection d'une manière sélective. Il n'en est rien. (En effet, les deux disjoncteurs sont nécessaires sur chaque trousson situé entre les deux centrales mais n'ont pas à être directionnels puisque la puissance ne s'écoule que dans le sens Crepelle \rightarrow Duvaud (Un Crepelle est en stand-by)

Ceci a été bien fait par le concepteur du réseau à part que sur le câble de transfert C_g il n'y a qu'un seul disjoncteur au lieu de deux comme déjà dit, ce qui a pour effet de rendre la protection non sélective en cas de faute sur ce câble.

On peut même tolérer de mettre un seul disjoncteur quand on sait que la probabilité d'avoir une faute sur C_g est très faible, étant donné sa petite longueur (20 m), mais dès lors il est souhaitable d'installer un sectionneur avec verrouillage à clef sur l'autre extrémité de C_g pour réduire la durée de coupure de courant consécutive à une éventuelle faute sur le câble de transfert. La clef du sectionneur S sera gardée dans la cellule des disjoncteurs D_9 ou D_{10} la plus proche si ces dernières sont du genre inaccessible sous tension. On évitera ainsi toute possibilité d'ou-

verture du sectionneur une fois en charge.

Retour sur la protection directionnelle

En analysant le schéma unifilaire général, on s'aperçoit qu'il y a un relais directionnel sur l'alternateur. Crepelle. Ce relais n'a pas la mission d'assurer une sélectivité mais plutôt de protéger l'alternateur contre un éventuel phénomène de pompage qui entraînerait des vibrations de la machine.

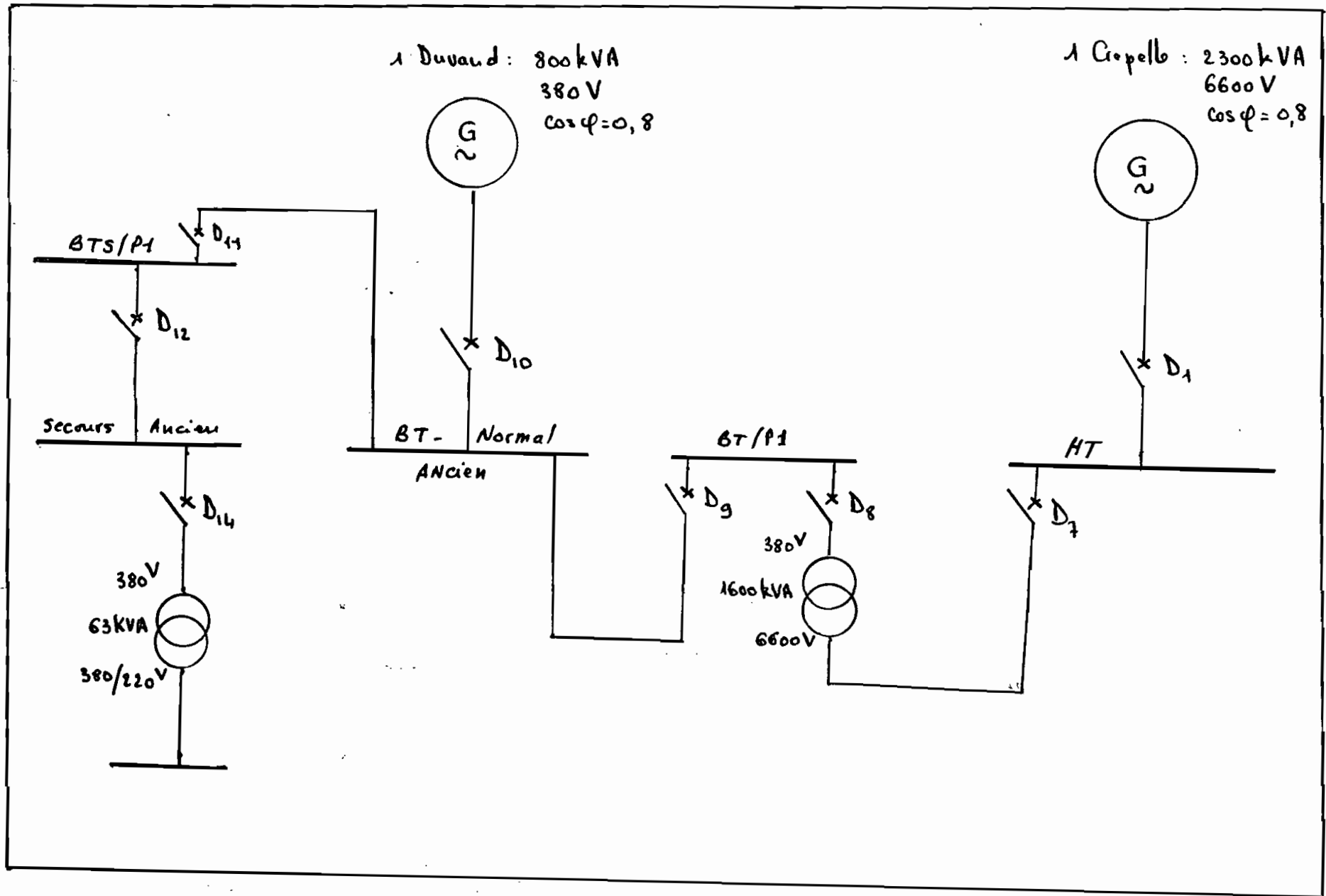


fig 11 : schéma d'étude de la protection et des cables
(mode 1)

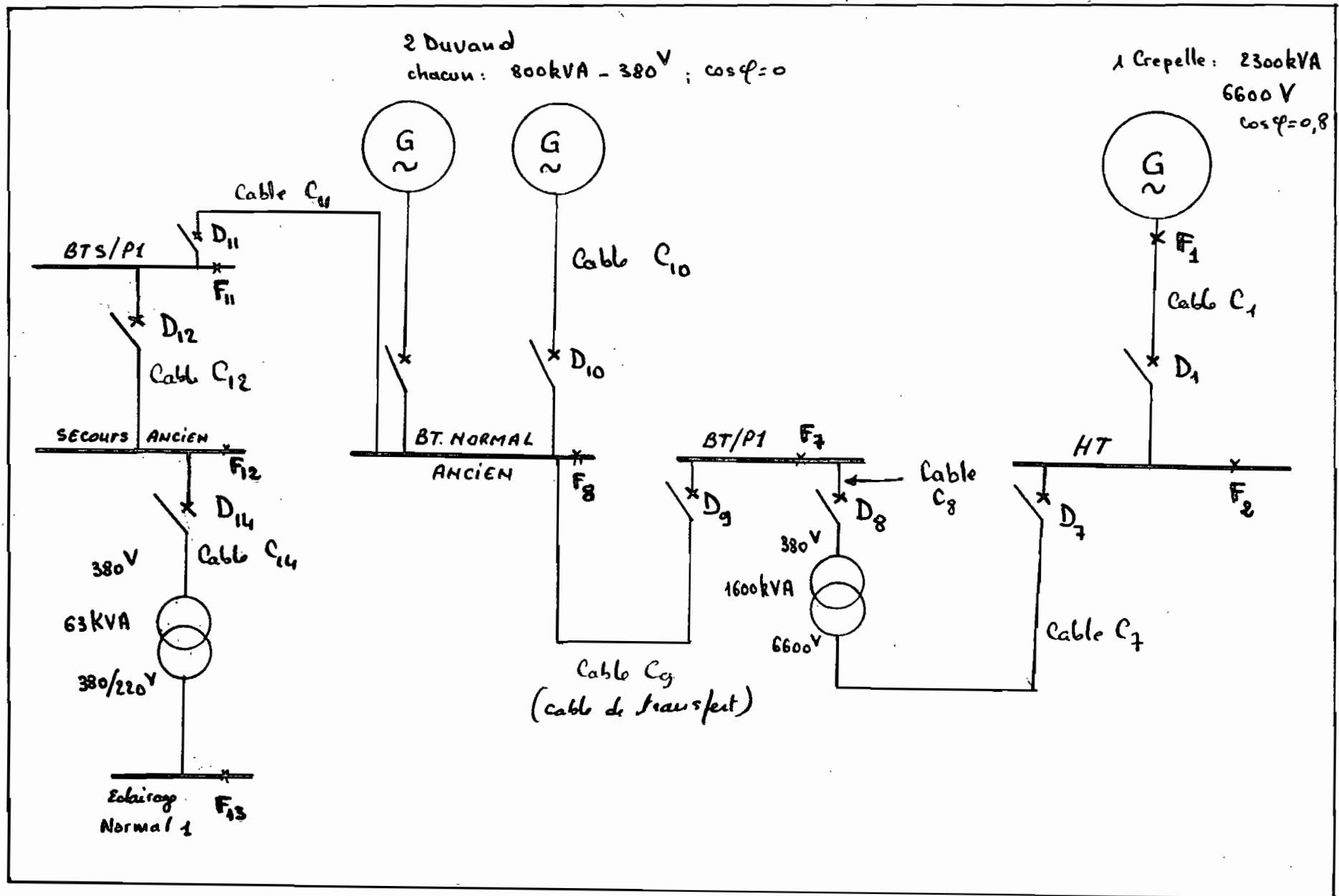


Fig. 12 : schéma d'étude de la protection et des cables (mode 2)

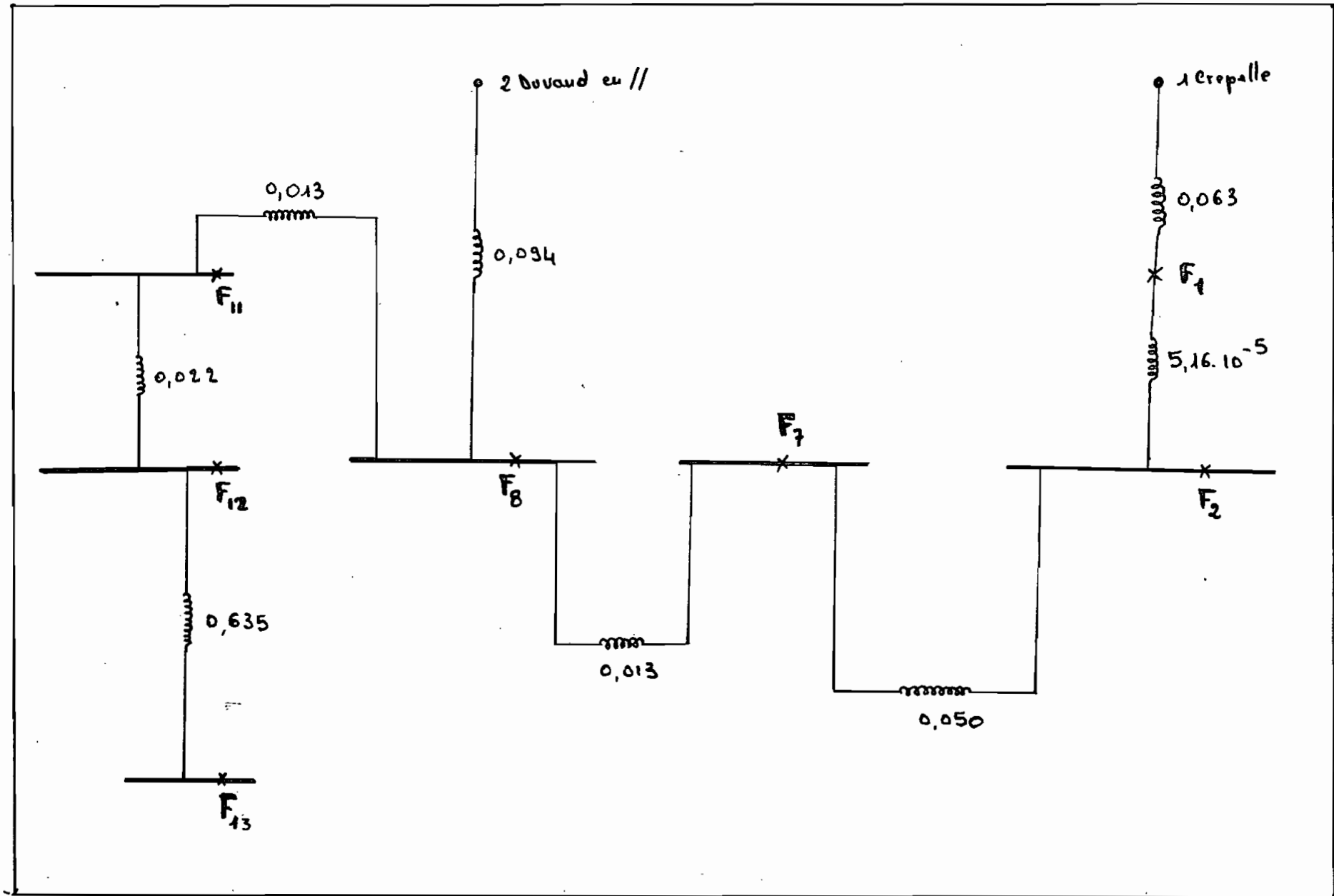


fig 13 : schéma des impédances relatives du circuit de la fig. 9.

-61-

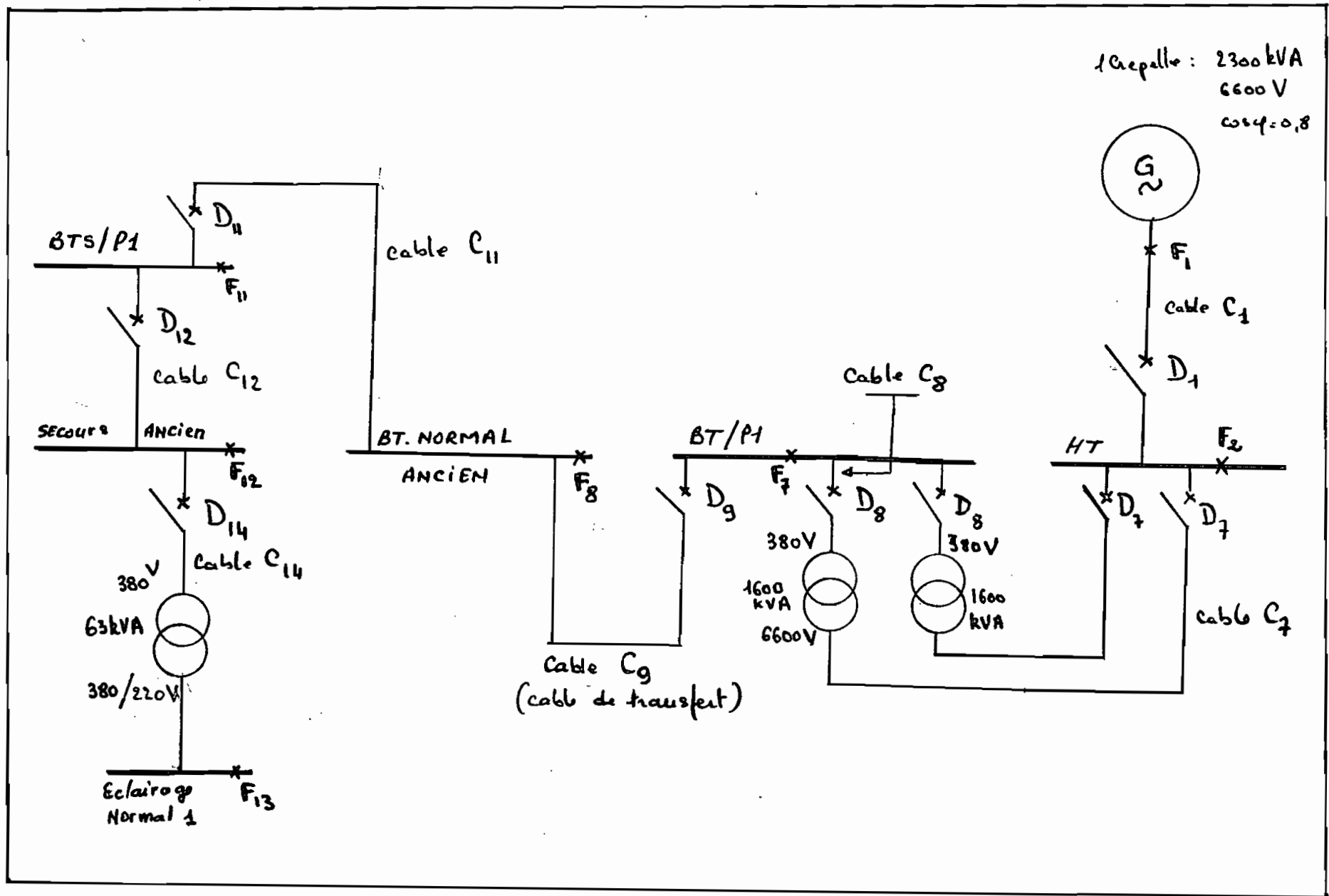


Fig. 14: schéma d'étude de la protection et des câbles (mode 3)

- 62 -

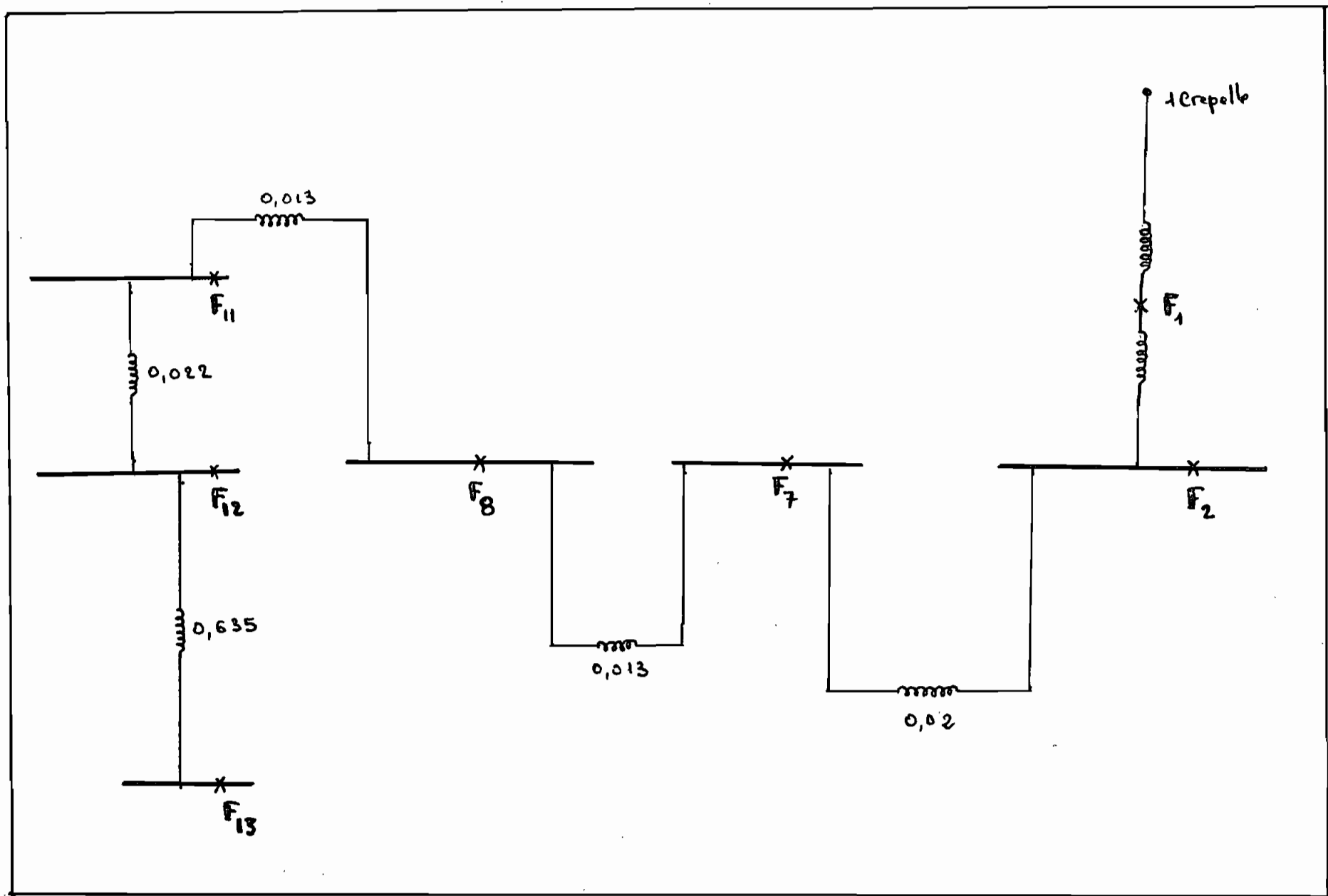


fig. 15: schéma des impédances relatives, du circuit de la fig. 14

III.2.1. Courant nominal (I_n)

C'est le courant maximum que le disjoncteur peut supporter en permanence sans dépasser un échauffement maximum fixé par les normes dans des conditions précises de température ambiante. Il est donné en valeur normalisée supérieure ou égale au courant de service I_b du câble sur lequel le disjoncteur est installé.

Si S désigne la puissance apparente (en kVA) transmise par le câble sous une tension U , le courant correspond I_b et donné par la relation

$$(1) \quad I_b = \frac{S * 1000}{\sqrt{3} * U} \quad [U] = V.$$

Pour les disjoncteurs placés à la sortie des groupes, les courants nominaux seront supposés égaux à ceux de ces machines.

Des lors

$$(2) \quad I_b = \frac{S_n * 1000}{\sqrt{3} * U}$$

avec :

S_n : puissance nominale de l'alternateur [kVA]

U : tension entre phases [V].

Remarque: les puissances S à prendre en compte dans la relation (1) sont données dans le tableau 13 avec l'hypothèse que les busbars sont chargés à 80%.

Tableau 13 Puissances à prendre en compte pour le calcul de I_b selon la relation (1).
(valeurs en kVA)

<div style="display: inline-block; transform: rotate(-45deg);"> modes câbles </div>	mode 1	mode 2	mode 3
C_9 (câble de transfert)	865	225	1505
C_{11}	120	120	120
C_{12}	41	41	41
C_7	1487	847	1064
C_8	1487	847	1064

Les Résultats de ces calculs sont donnés aux tableaux 23, 24 et 25.

III. 2.2. Courant de réglage du magnétique (I_{rm})

Il est donné par le courant de court-circuit minimal en des points dont la localisation dépend, du type de sélectivité utilisée dans l'usine (sélectivité ampérométrique ou chronométrique). Le courant minimum est une fraction du courant de court-circuit triphasé stationnaire au point considéré. La valeur de cette fraction dépend du régime du neutre. On démontre facilement que ce courant de court-circuit minimal est donné par:

$$I_{cc_{min}} = \frac{I_{cc}}{2}$$

$$= I_{cc(1)}$$

Si le neutre est directement mis à la terre ou par l'intermédiaire d'une faible impédance.

$$I_{cc_{min}} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{cc}$$

$$= I_{cc(2)}$$

Si le neutre est isolé ou relié à la terre par une forte impédance.

avec :

I_{cc} : courant de court-circuit triphasé stationnaire

$I_{cc(1)}$: courant de court-circuit monophasé

$I_{cc(2)}$: courant de court-circuit biphasé

Il convient de signaler que l'étude sur la sélectivité n'a pas pu être faite puisque elle nécessite, d'une part la connaissance du type de sélectivité et d'autre part les courbes de déclenchement de tous les disjoncteurs, ce dont nous ne disposons pas.

Rappelons aussi qu'aucune hypothèse ne peut être formulée à ce propos, car l'installation est déjà existante. De telles suppositions feraient perdre au projet tout son sens.

Bref, de toutes les manières le calcul du courant de court-circuit, qui constitue la principale étape de la détermination du courant de réglage est déjà fait dans ce rapport: Il suffit de disposer des informations citées ci-dessus pour que la question soit résolue.

III.2.3 Pouvoir de coupure (Pdc)

Il s'exprime par une valeur de courant efficace symétrique que l'appareil peut interrompre sans détériorations nuisibles ni manifestations extérieures excessives, un nombre de fois déterminé dans des conditions spécifiées. Il est au moins égal au courant de court-circuit triphasé stationnaire qui transite par l'artère sur laquelle le disjoncteur est installé.

Dans notre cas où la distribution n'est pas radiale, la connaissance du courant de court-circuit à considérer pour chaque

disjoncteur requiert la détermination de la répartition du courant suite à des fautes en des points appropriés. Ainsi nous obtenons :

— SELON MODE 2 (cf. fig 8)

1°) Disjoncteur D_1 .

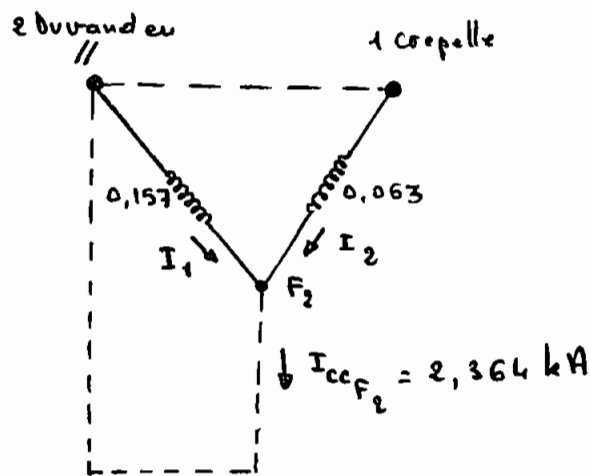
Le courant de court-circuit qui détermine le Pdc de D_1 est celui en F_2 .

Le courant issu du Crepelle est limité par l'impédance de la source elle-même et par celle du câble C_1 , les deux étant en série.

Celui issu des deux Durand en parallèle est limité par les impédances de la source équivalente, ainsi obtenue, du câble C_{10} , du câble C_9 , du câble C_8 , du transfo TR1 et du câble C_7 , toutes en série.

Le courant le plus élevé de ces deux détermine le Pdc de D_1 .

Négligeant l'apport des moteurs au courant de court-circuit, nous obtenons le schéma résultant suivant :



$$I_1 = I_{ccF_2} \frac{0,157 // 0,063}{0,157} = 2,364 \frac{0,045}{0,157} = 0,678 \text{ kA}$$

$$I_2 = 2,364 \frac{0,045}{0,063} = 1,688 \text{ kA} \text{ qui est alors la valeur de-terminante pour } D_1.$$

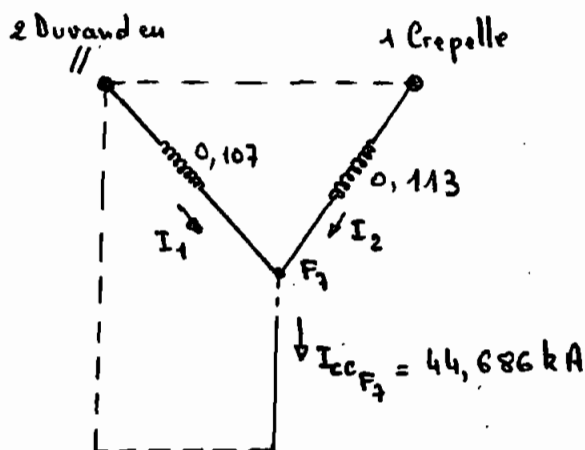
2°) Disjoncteur D7

On considère une faute en F_2 et on obtient le même schéma que pour D_1 . Le courant déterminant reste

$$I_2 = 1,688 \text{ kA pour } D_7.$$

3°) Disjoncteur D8

On considère une faute en F_2 et on obtient le schéma :



$$I_1 = I_{ccF_7} \cdot \frac{(0,107 // 0,113)}{0,107} = 44,686 \text{ kA} \cdot \frac{0,054}{0,107} = 22,552 \text{ kA}$$

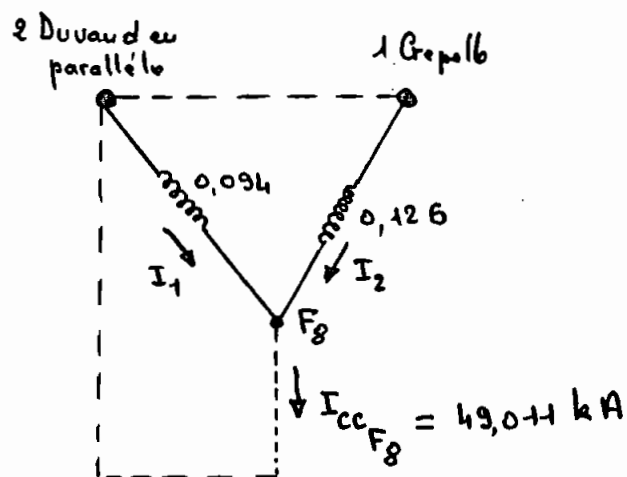
$$I_2 = 44,686 \cdot \frac{0,054}{0,113} = 21,354 \text{ kA}$$

D'où $I_1 = 22,552 \text{ kA}$ courant déterminant pour D_8 .

$I_2 = 22,138 \text{ kA}$ traversée à l'occasion par D_1 et D_7 et est supérieur aux valeurs de courant préalablement retenues pour ces disjoncteurs. D'où $I_2 = 22,552 \text{ kA}$, nouveau courant déterminant pour D_1 et D_7 .

4) Disjoncteur D_9 .

En plus de la faute en F_7 déjà examinée, considérons la faute en F_8 . Nous obtenons :



$$I_1 = I_{ccF_8} \cdot \frac{(0,094 // 0,126)}{0,094} = 49,011 \cdot \frac{0,053}{0,094} = 28,070 \text{ kA}$$

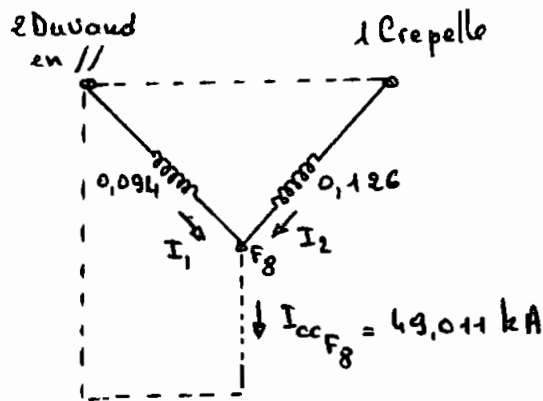
$$I_2 = 49,011 \cdot \frac{0,053}{0,126} = 20,941 \text{ kA}$$

le courant I_2 qui traverse D_9 en cas de faute en F_8 est plus petit que le courant I_1 qui le sollicitait en cas de faute en F_7 . D'où

$$\underline{\underline{\text{Courant déterminant le Pdc de } D_9 = I_1 = 22,552 \text{ kA}}}$$

5°) Disjoncteur D_{10}

Considérant la faute en F_8 , on obtient :



$$I_1 = 49,011 \frac{0,094 // 0,126}{0,094} = 28,070 \text{ kA}$$

$$I_2 = 49,011 \frac{0,094 // 0,126}{0,126} = 20,941 \text{ kA}$$

D'où

$$\underline{\underline{I_2 = 28,070 \text{ kA déterminant le Pdc de } D_{10}}}$$

6°) Disjoncteur D_{11}

son Pdc est déterminé par

$$\underline{\underline{I_{ccF_{11}} = 34,530 \text{ kA}}}$$

7°) Disjoncteur D₁₂

Il est associé au fusible f_{12} . Leur Pdc sont déterminés par un court-circuit en F_{12} :

$$\underline{\underline{I_{cc_{F_{12}}} = 34,530 \text{ kA}}}$$

8°) Disjoncteur D₁₄

Il est associé au fusible f_{14} . Leur Pdc sont déterminés par un court-circuit en F_{14} :

$$\underline{\underline{I_{cc_{F_{14}}} = 23,020 \text{ kA}}}$$

SELON MODE 3 (cf. fig 9)

Le réseau est alors radial et la situation est plus simple

Nous obtenons :

- Pour disjoncteur D₁ : $I_{cc_{F_2}} = 1,715 \text{ kA}$
- Pour disjoncteur D₇ : $I_{cc_{F_2}} = 1,715 \text{ kA}$
- Pour disjoncteur D₈ : $I_{cc_{F_7}} = 23,740 \text{ kA}$
- Pour disjoncteur D₉ : $I_{cc_{F_7}} = 23,740 \text{ kA}$

- Disjoncteur D_{11} $I_{cc_{F_{11}}} = 16,882 \text{ kA}$

- Disjoncteur D_{12} $I_{cc_{F_{11}}} = 16,882 \text{ kA}$

- Disjoncteur D_{14} $I_{cc_{F_{12}}} = 13,566 \text{ kA}$

- SELON MODE 4

Le Pdc du disjoncteur D_{13} sera déterminé par le courant de court-circuit en F_{11} selon mode 4.

Soit $I_{cc_{F_{11}}} = 10,197 \text{ kA}$.

III.2.4. Pouvoir de fermeture (PDF)

C'est un critère de choix de disjoncteurs beaucoup plus important dans les circuits capacitifs que dans le notre.

Il s'exprime par une valeur de courant que le disjoncteur peut établir, sans détériorations nuisibles ni manifestations excessives, un nombre de fois déterminé, dans des conditions déterminées. Ce courant doit être supérieur à la première cote, asymétrique, du courant de court-circuit,

$I_{cc_{max}}$:

$$I_{cc_{max}} = K \cdot \sqrt{2} \cdot I_{cc}$$

où I_{cc} : valeur efficace du courant de court-circuit triphasé stationnaire.

K : constante dépendant du rapport R/X . Elle est donnée dans la documentation américaine dont nous disposons pour la fréquence de 60 Hz. Pour l'obtenir à 50 Hz il faut multiplier R/X par $6/5$ avant d'utiliser l'abaque.

Nous préférons à l'abaque, l'expression théorique

$$K = 1 + e^{-\frac{R}{X} \cdot \pi}$$

où R et X , sont calculées dans les tableaux 16 à 22. Le rapport R/X est calculé dans les tableaux 26 à 29.

Le $I_{cc_{max}}$, ainsi déterminé, doit pouvoir traverser le disjoncteur correspondant, sans y induire des contraintes thermiques et mécaniques pouvant détruire l'appareil.

Les différentes caractéristiques des disjoncteurs $D_1, D_7, D_8, D_9, D_{10}, D_{11}, D_{12}, D_{13}$ et D_{14} , doivent être déterminées à partir des valeurs données au tableau 30.

Calcul de la résistance R et de la réactance X des éléments du réseau.

Ceci nous permet de calculer le rapport R/X pour pouvoir déterminer le courant de court-circuit maximum $I_{cc\max}$ mentionné plus haut.

R et X ont été déjà calculés pour les cables (voir tableau 4). Nous les déterminons ici pour les alternateurs, transfos, réseau amont et moteurs asynchrones (il s'agit de ceux dont la contribution au courant de court-circuit n'est pas considérée comme négligeable. Nous ignorons les moteurs de puissance inférieure à 40 kW conformément à notre hypothèse mentionnée plus haut.)

Sachant que

$$Z = \frac{U^2}{P_n} \times \frac{e}{100} \quad \text{avec}$$

e : réactance subtransitoire pour les moteurs et les alternateurs, tension de court-circuit pour les transfos

U : tension entre phase en V.

P_n : Puissance nominale en VA pour les transfos et les alternateurs, en W pour les moteurs.

et

$$Z = \frac{U^2}{P_{cc}} \quad \text{pour le réseau amont}$$

où U = tension SENELEC ie 6600 V

P_{cc} : Puissance de court-circuit. Nous l'estimons à $250 \text{ MVA} = 250 \cdot 10^6 \text{ VA}$, faute de données exactes.

Nous pouvons ainsi calculer R et X selon la relation

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad \text{appuyés de}$$

l'hypothèse $R/X \approx 0,15$.

Les résultats de ces calculs sont consignés dans le tableau 14.

Remarque : les impédances des transformateurs sont déterminées à partir du tableau 52 de la page 73 du guide de l'installation électrique Merlin Gerin.

Tableau 14 : Impédances des sources et Transformateurs.

Désignation	P_n [kVA]	Z [Ω]	R [Ω]	X [Ω]
Source Duvaud	800	0,027	$4 \cdot 10^{-3}$	0,026
Source Crepelle	2300	2,75	0,410	2,72
Transfo TRO	315	$20,3 \cdot 10^{-3}$	$6,28 \cdot 10^{-3}$	$19,3 \cdot 10^{-3}$
Transfo TR1	1600	$6 \cdot 10^{-3}$	$1,13 \cdot 10^{-3}$	$5,89 \cdot 10^{-3}$
Transfo TR11	630	$10,16 \cdot 10^{-3}$	$2,62 \cdot 10^{-3}$	$9,82 \cdot 10^{-3}$
Transfo TRE11	25	0,256	0,179	0,183
Transfo TR12	250	$25,6 \cdot 10^{-3}$	$8,3 \cdot 10^{-3}$	$24,2 \cdot 10^{-3}$
Transfo TRE12	10	0,640	0,126	0,628
Transfo TRE ₁	63	0,106	$15 \cdot 10^{-3}$	0,100
Transfo TRE ₂	200	$32 \cdot 10^{-3}$	$11,4 \cdot 10^{-3}$	$29,9 \cdot 10^{-3}$
Transfo TRES	10	0,640	0,126	0,628

- Schémas équivalents des résistances et réactances.

Chacun d'eux est un schéma unifilaire dans lequel les éléments du réseau sont représentés par leur résistance et réactance, respectivement.

Dépendamment du mode d'alimentation (mode 1, 2, 3 et 4 préalablement définis) nous obtenons les schémas des figures 16 à 29.

Par les règles d'association des impédances nous obtenons les schémas équivalents simplifiés.

- Calcul de la résistance et de la réactance résultantes entre sources et points de défauts respectifs.

Les valeurs de résistance et réactance à prendre en compte pour le calcul du rapport R/X aux points de défauts respectifs, sont consignées dans les tableaux 16 à 22.

Le principe de calcul est similaire à celui du paragraphe III.15.

Tableau 15 : Détermination de R et X équivalents des moteurs pouvant contribuer au courant de court-circuit.

Designation :	P [kW]	Z [Ω]	X [Ω]	X ⁻¹ [Ω^{-1}]	R [Ω]	R ⁻¹ [Ω^{-1}]
<u>BT. Normal</u> <u>Ancien</u>						
G 107 A	40,5	0,606	0,599	1,669	0,09	11,111
I 301 A	55	0,446	0,441	2,268	0,066	15,152
G 107 B	40,5	0,606	0,599	1,669	0,09	11,111
G 501 B	94	0,261	0,258	3,876	0,039	25,641
G 101 C	170	0,144	0,142	7,042	0,021	47,619
G 502 A	40,5	0,606	0,599	1,669	0,09	11,111
G 402	40,5	0,606	0,599	1,669	0,09	11,111
G 504 A	61	0,402	0,398	2,512	0,06	16,667
G 504 B	61	0,402	0,398	2,512	0,06	16,667
G 504 C	55	0,446	0,441	2,268	0,066	15,152
G 503 A	79	0,311	0,308	3,247	0,046	21,739
G 503 B	79	0,311	0,308	3,247	0,046	21,739
G 503 C	190	0,129	0,128	7,812	0,019	52,632
G 201 B	75	0,327	0,323	3,096	0,048	20,833
GM 120 A	132	0,186	0,184	3,922	0,028	35,714
GM 120 B	132	0,186	0,184	3,922	0,028	35,714

Tableau 15: (suite)

	P [kW]	Z [Ω]	X [Ω]	X ⁻¹ [Ω ⁻¹]	R [Ω]	R ⁻¹ [Ω ⁻¹]
GM 201 B	75	0,327	0,323	3,096	0,048	20,833
G 305 A	95	0,258	0,255	3,922	0,038	26,316
G 305 B	95	0,258	0,255	3,922	0,038	26,316
			<u>0,0151</u> ←	66,366	<u>2,56.10⁻³</u> ←	443,178
<u>BT/P1</u>						
GM 143	55	0,446	0,441	2,268	0,066	15,152
GM 146 A	45	0,546	0,540	1,852	0,081	12,346
GM 146 B	45	0,546	0,540	1,852	0,081	12,346
GM 201 NA	55	0,446	0,441	2,268	0,066	15,152
GM 202 NA	45	0,546	0,540	1,852	0,081	12,346
GM 202 NB	45	0,546	0,540	1,852	0,081	12,346
			<u>0,0837</u> ←	11,944	<u>0,0125</u> ←	79,688
<u>HT</u>						
GM 101	175	35,559	35,116	0,028	5,275	0,190

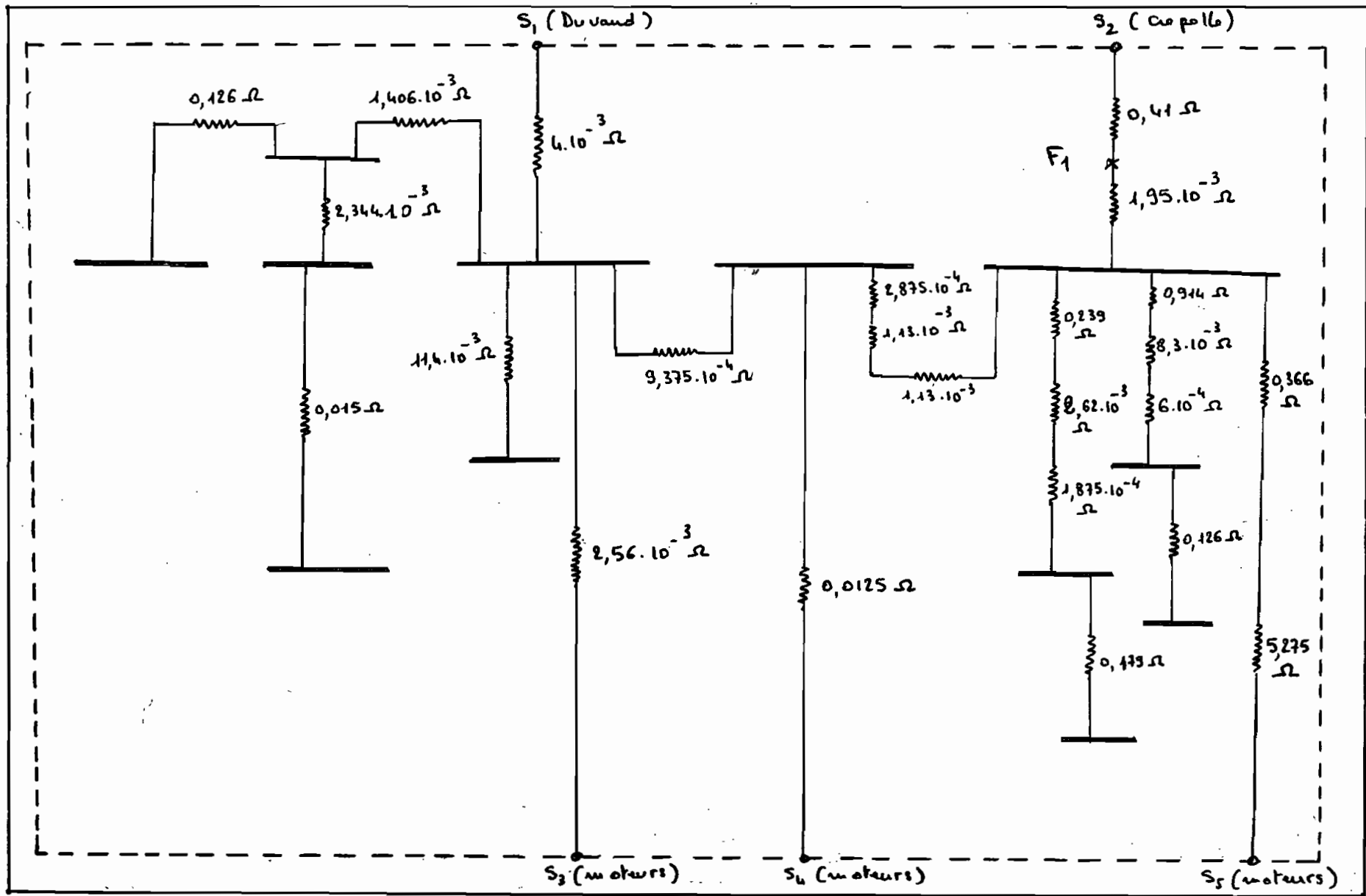


Fig. 16 : schéma équivalent des résistances
(mode 1)

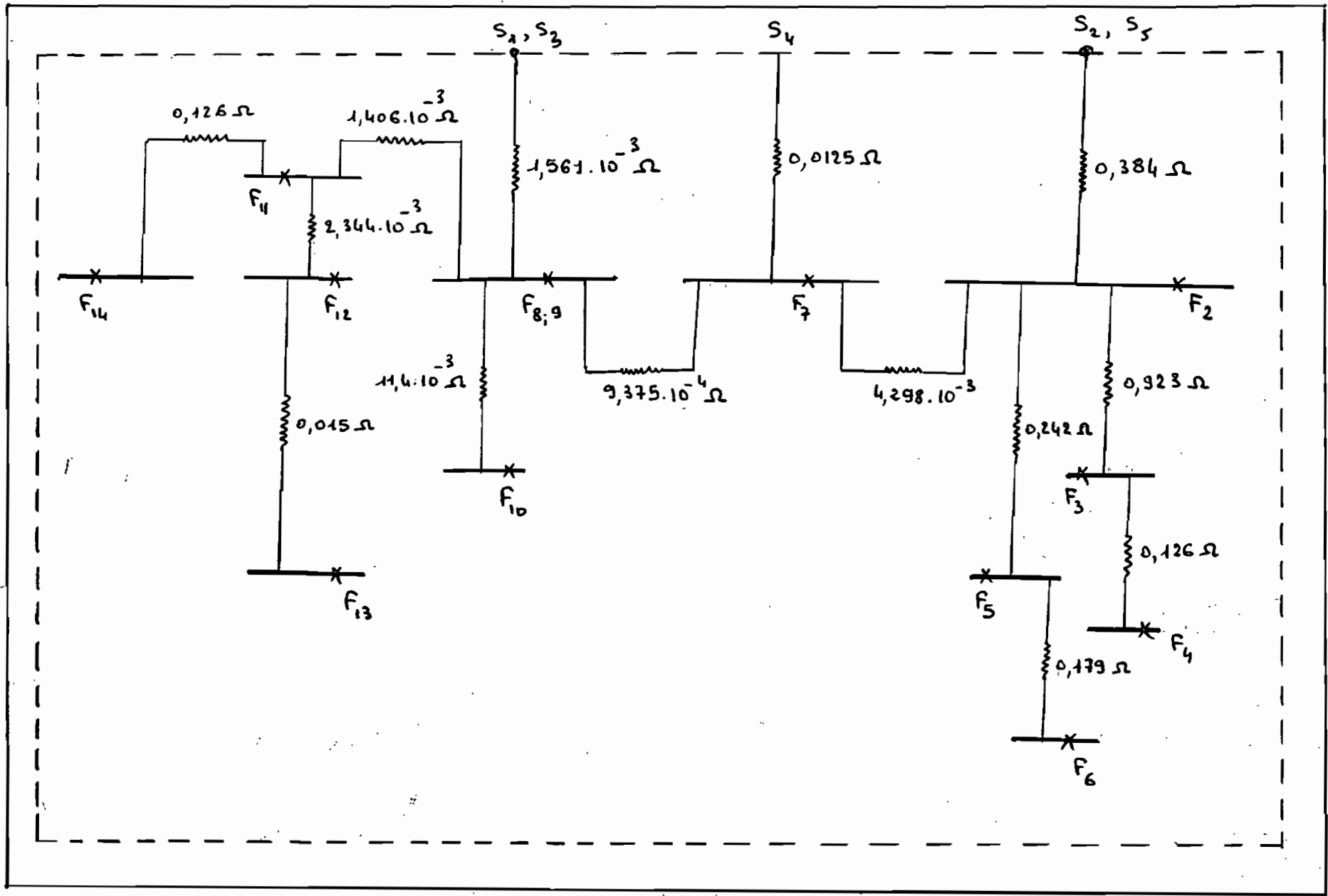


fig. 17 : schéma équivalent simplifié des résistances
(mode 1)

16.1

Tableau 16: Détermination de R aux différents points de faute (mode 1)

Faute en F_1		Faute en F_2		Faute en F_3		Faute en F_4		Faute en F_5		Faute en F_6		Faute en F_7	
R	R^{-1}	R	R^{-1}	R	R^{-1}	R	R^{-1}	R	R^{-1}	R	R^{-1}	R	R^{-1}
$1,561 \cdot 10^{-3}$		$1,561 \cdot 10^{-3}$		$6,266 \cdot 10^{-3}$		0,929		$6,266 \cdot 10^{-3}$		0,248		$6,266 \cdot 10^{-3}$	
$9,375 \cdot 10^{-4}$		$9,375 \cdot 10^{-4}$		0,923		0,126		0,242		0,179		$4,238 \cdot 10^{-3}$	
<u>$2,498 \cdot 10^{-3} \rightarrow 400,3$</u>		<u>$2,498 \cdot 10^{-3} \rightarrow 400,3$</u>		<u>0,929</u>		<u>1,055</u>		<u>0,248</u>		<u>0,427</u>		<u>0,011</u>	
0,0125 \rightarrow 80		0,0125 \rightarrow 80											
$2,08 \cdot 10^{-3} \leftarrow 480,3$		$2,08 \cdot 10^{-3} \leftarrow 480,3$											
$4,298 \cdot 10^{-3}$		$4,298 \cdot 10^{-3}$											
$6,378 \cdot 10^{-3} \rightarrow 157$		$6,378 \cdot 10^{-3} \rightarrow 157$											
5,641 \rightarrow 0,177		0,384 \rightarrow 2,60											
$6,36 \cdot 10^{-3} \leftarrow 157,177$		<u>$6,266 \cdot 10^{-3} \leftarrow 159,60$</u>											
$1,95 \cdot 10^{-3}$													
$8,31 \cdot 10^{-3} \rightarrow 120,132$													
0,41 \rightarrow 2,439													
<u>$8,154 \cdot 10^{-3} \leftarrow 122,634$</u>													

- 83 -

Tableau 16: (suite)

Fauts en F_8		Fauts en F_9		Fauts en F_{10}		Fauts en F_{11}		Fauts en F_{12}		Fauts en F_{13}		Fauts en F_{14}	
R	R^{-1}	R	R^{-1}	R	R^{-1}	R	R^{-1}	R	R^{-1}	R	R^{-1}	R	R^{-1}
0,384				$1,39 \cdot 10^{-3}$		$1,39 \cdot 10^{-3}$		$2,79 \cdot 10^{-3}$		$5,13 \cdot 10^{-3}$		$2,79 \cdot 10^{-3}$	
$4,928 \cdot 10^{-3}$		<u><u>$1,39 \cdot 10^{-3}$</u></u>		$11,4 \cdot 10^{-3}$		$1,406 \cdot 10^{-3}$		$2,344 \cdot 10^{-3}$		0,015		0,126	
<u>0,389</u> → 2,571				<u><u>$12,79 \cdot 10^{-3}$</u></u>		<u><u>$2,79 \cdot 10^{-3}$</u></u>		<u><u>$5,13 \cdot 10^{-3}$</u></u>		<u><u>0,020</u></u>		<u><u>0,129</u></u>	
0,0125 → 80													
<u>0,012</u> → 82,571													
$9,375 \cdot 10^{-4}$													
<u>0,013</u> → 76,52													
$1,561 \cdot 10^{-3}$ → 640,61													
<u><u>$1,39 \cdot 10^{-3}$</u></u> → 717,53													

- 84 -

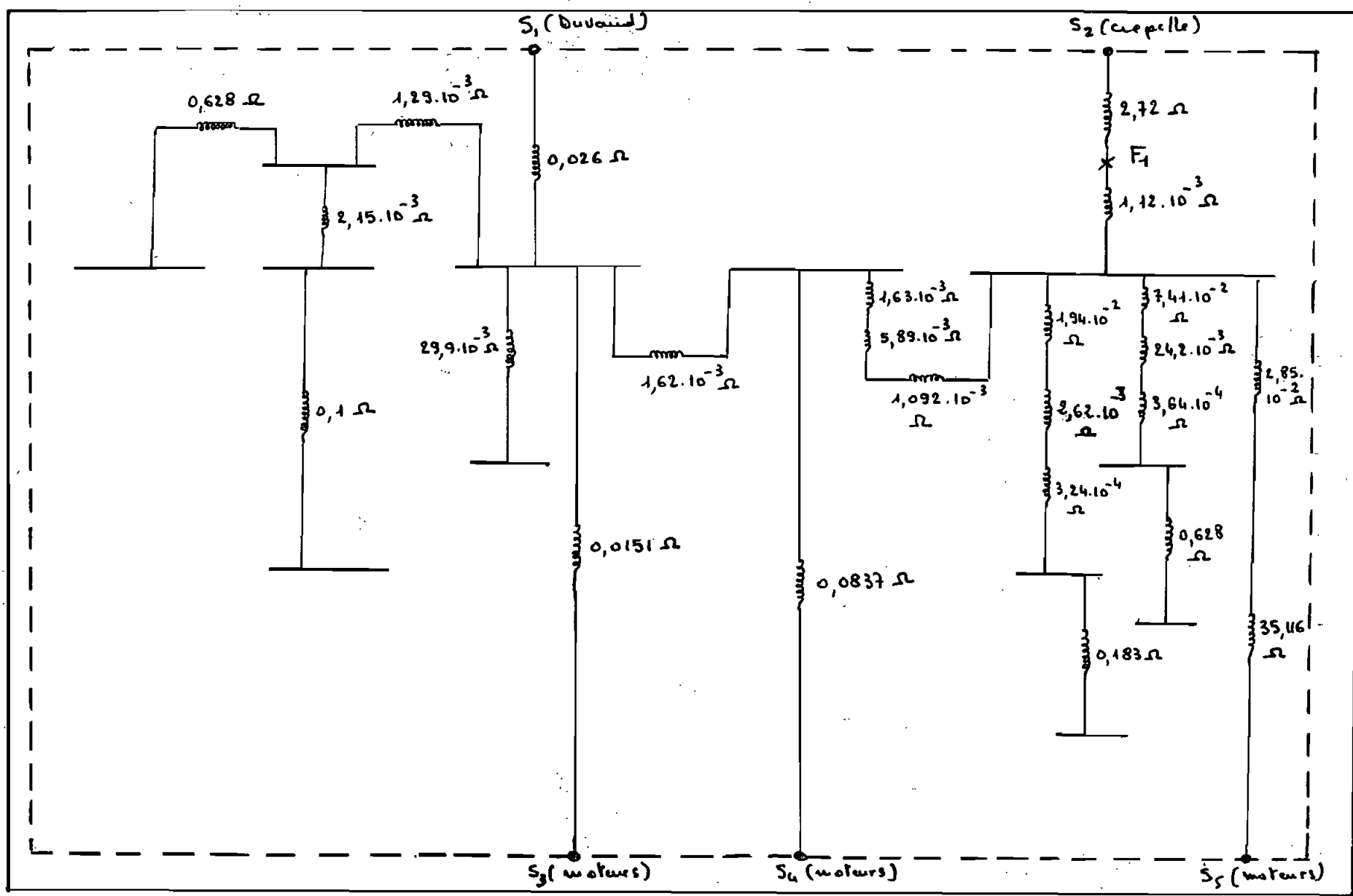


fig.18 : schéma équivalent des réactances
(mode 1)

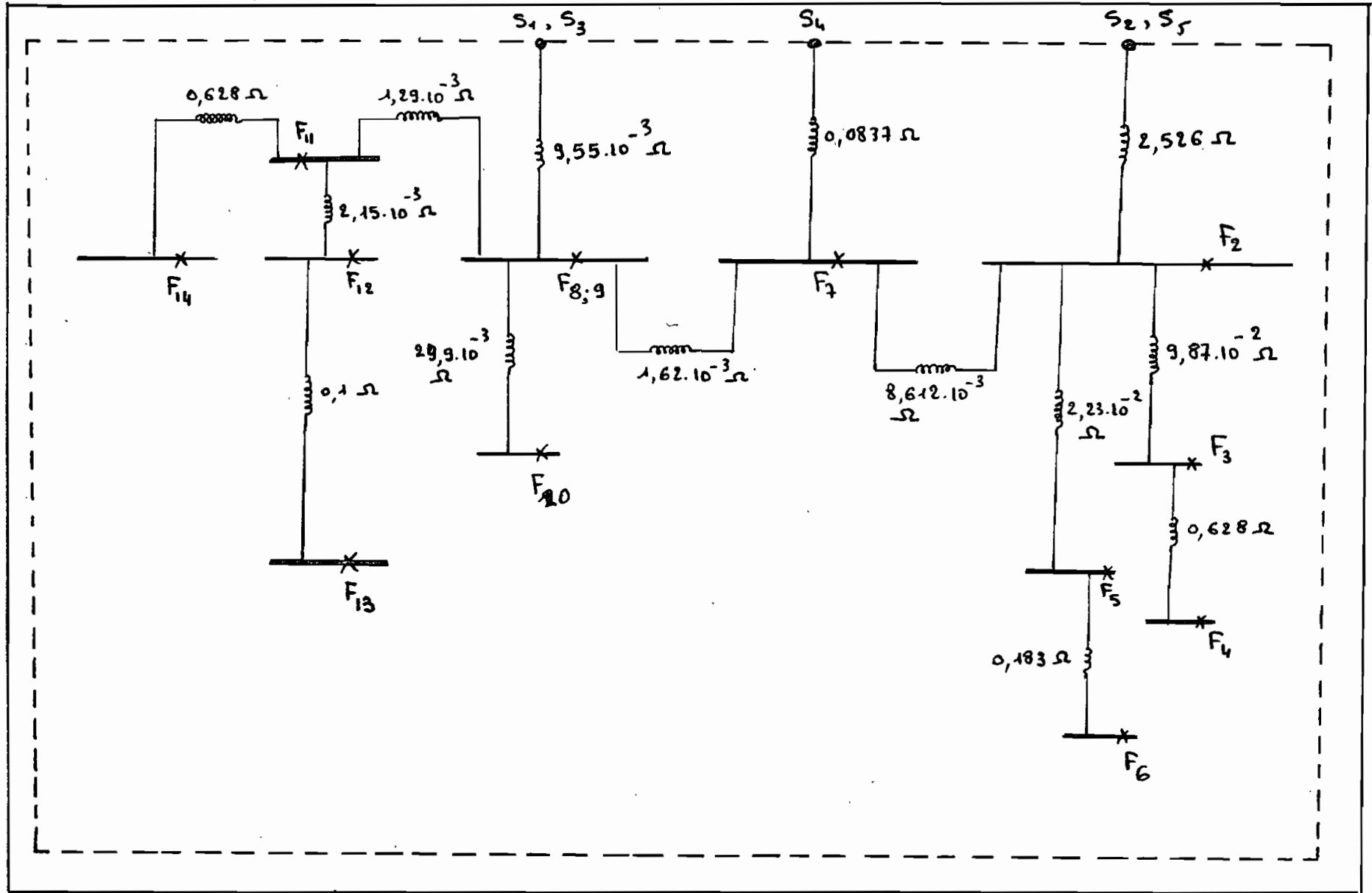


fig. 19 : schéma équivalent simplifié des réactances
(mode 1)

Tableau 17 : Détermination de X aux différents points de faute (mode 1)

Faute en F ₁		Faute en F ₂		Faute en F ₃		Faute en F ₄		Faute en F ₅		Faute en F ₆		Faute en F ₇	
X	X ⁻¹	X	X ⁻¹	X	X ⁻¹	X	X ⁻¹	X	X ⁻¹	X	X ⁻¹	X	X ⁻¹
9,55.10 ⁻³		9,55.10 ⁻³		0,018		0,117		0,018		0,040		0,018	
1,62.10 ⁻³		1,62.10 ⁻³		9,87.10 ⁻²		0,628		2,23.10 ⁻²		0,183		8,612.10 ⁻³	
0,041 → 90,90		0,041 → 90,9		0,117		0,745		0,040		0,223		0,027	
0,0837 → 11,95		0,0837 → 11,95											
9,72.10 ⁻³ ← 102,85		9,72.10 ⁻³ ← 102,85											
8,612.10 ⁻³		8,612.10 ⁻³											
0,018 → 55,56		0,018 → 55,56											
35,144 → 0,028		2,526 → 0,396											
0,018 ← 55,588		0,018 ← 55,956											
1,12.10 ⁻³													
0,049 → 52,63													
2,72 → 0,37													
0,049 ← 53													

Tableau 17 : (Suite)

Faute en F_8		Faute en F_9		Faute en F_{10}		Faute en F_{11}		Faute en F_{12}		Faute en F_{13}		Faute en F_{14}	
X	X^{-1}	X	X^{-1}	X	X^{-1}	X	X^{-1}	X	X^{-1}	X	X^{-1}	X	X^{-1}
2,526				$8,56 \cdot 10^{-3}$		$8,56 \cdot 10^{-3}$		$9,85 \cdot 10^{-3}$		0,012		$9,85 \cdot 10^{-3}$	
$8,642 \cdot 10^{-3}$		<u>$8,56 \cdot 10^{-3}$</u>		$29,9 \cdot 10^{-3}$		$1,29 \cdot 10^{-3}$		$2,15 \cdot 10^{-3}$		0,1		0,628	
<u>2,535</u> → 0,394				<u>0,038</u>		<u>$9,85 \cdot 10^{-3}$</u>		<u>0,012</u>		<u>0,112</u>		<u>0,638</u>	
0,0837 → 11,95													
0,081 ← 12,344													
$1,62 \cdot 10^{-3}$													
<u>0,083</u> → 12,05													
$9,55 \cdot 10^{-3}$ → 104,71													
<u>$8,56 \cdot 10^{-3}$</u> ← 106,76													

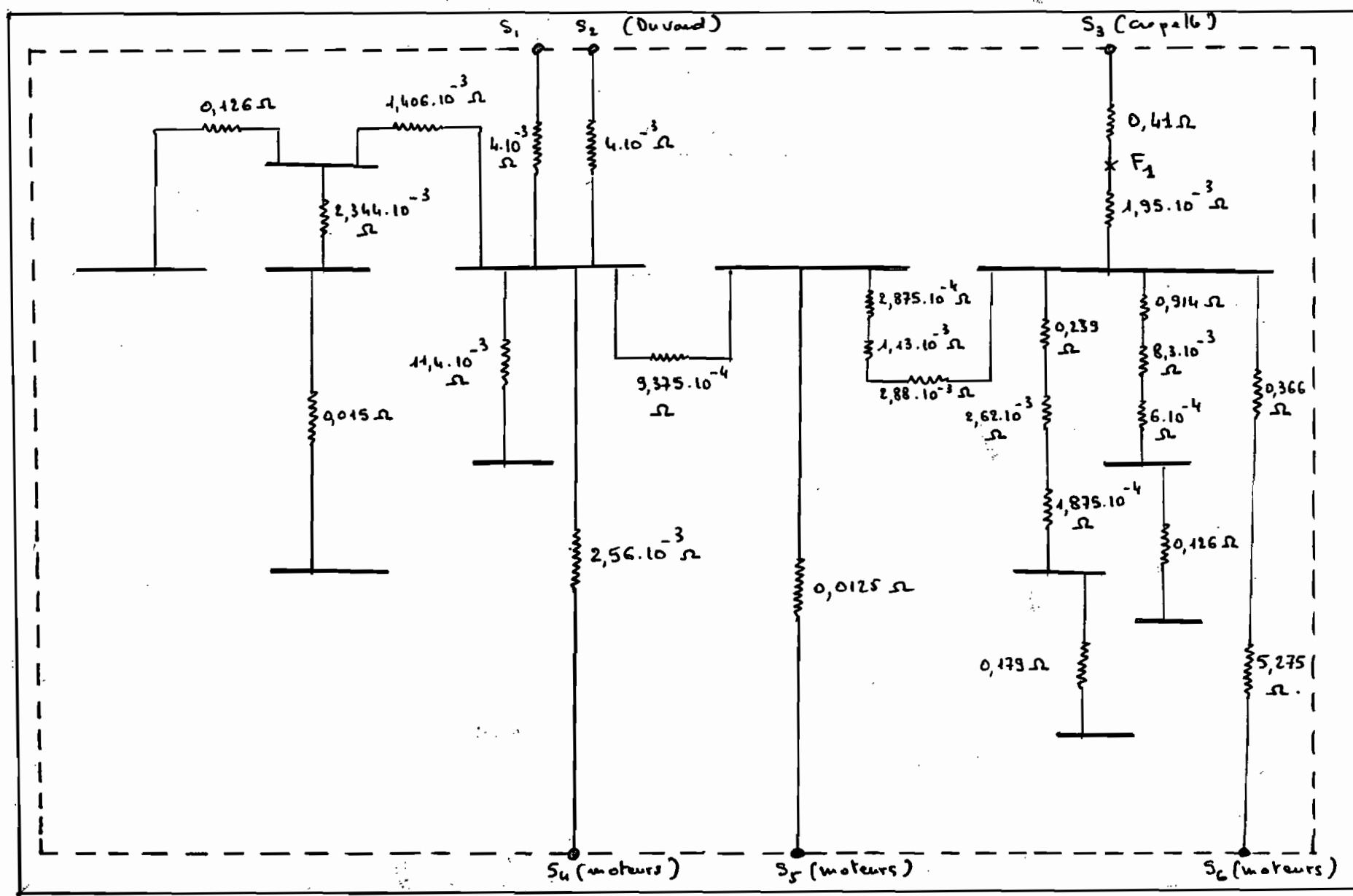


fig 20: schéma équivalent des résistances
(mode 2)

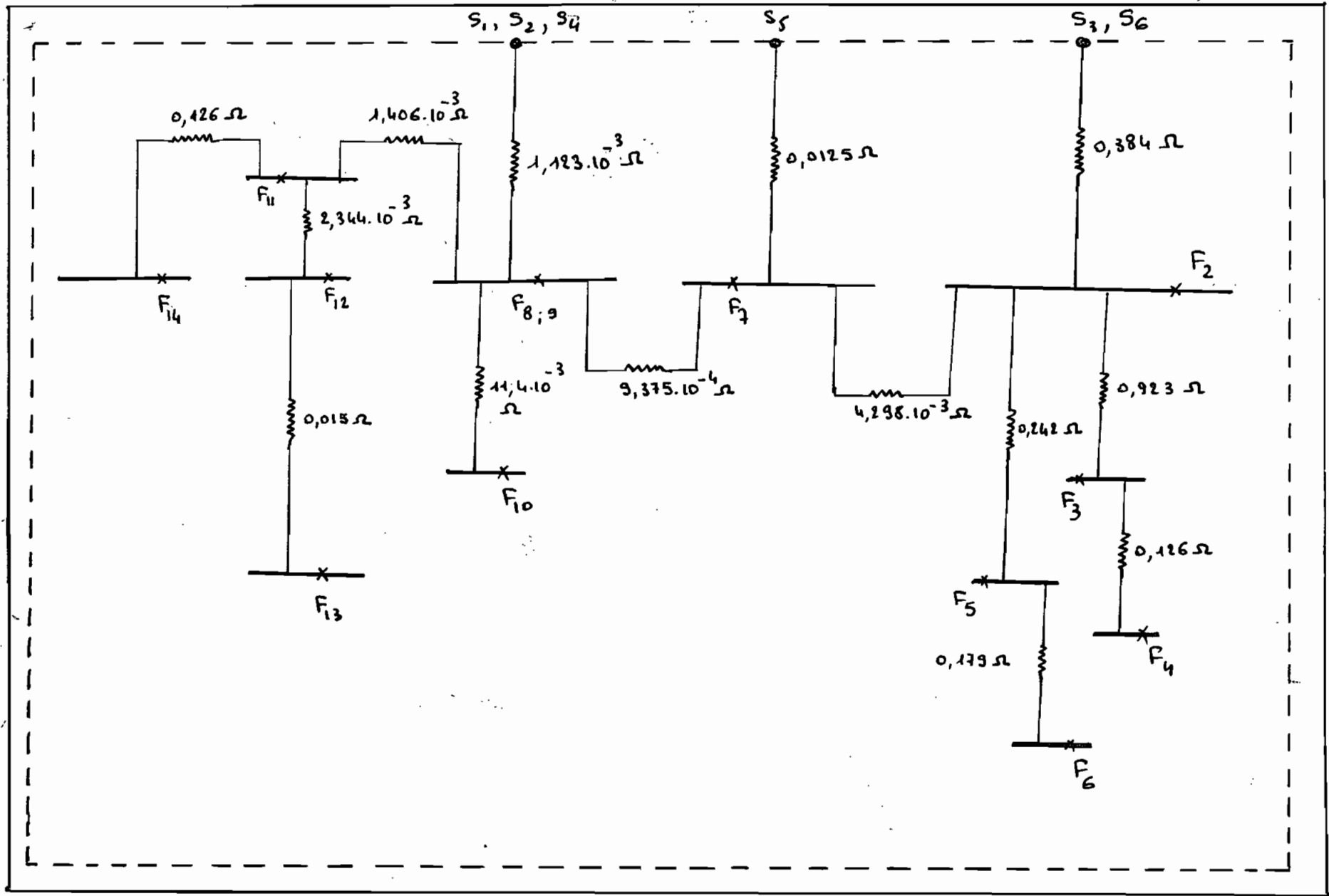


Fig 21 : schéma équivalent simplifié des résistances
(mode 2)

Tableau 18 : Détermination de R aux différents points de faute (mode 2)

faute en F ₁		faute en F ₂		faute en F ₃		faute en F ₄		faute en F ₅		faute en F ₆		faute en F ₇	
R	R ⁻¹	R	R ⁻¹	R	R ⁻¹	R	R	R	R	R	R	R	R
1,123.10 ⁻³		1,123.10 ⁻³		5,97.10 ⁻³		0,929		5,97.10 ⁻³		0,248		5,97.10 ⁻³	
9,375.10 ⁻⁴		9,375.10 ⁻⁴		0,923		0,126		0,242		0,179		4,298.10 ⁻³	
<u>2,06.10⁻³ → 485</u>		<u>2,06.10⁻³ → 485</u>		<u>0,929</u>		<u>1,055</u>		<u>0,248</u>		<u>0,427</u>		<u>0,010</u>	
0,0125 → 80		0,0125 → 80											
<u>1,77.10⁻³ ← 565</u>		<u>1,77.10⁻³ ← 565</u>											
4,298.10 ⁻³		4,298.10 ⁻³											
<u>6,07.10⁻³ → 165</u>		<u>6,07.10⁻³ → 165</u>											
5,641 → 0,177		0,384 → 2,604											
<u>6,05.10⁻³ ← 165,177</u>		<u>5,97.10⁻³ ← 167,604</u>											
1,95.10 ⁻³													
<u>8.10⁻³ → 125</u>													
0,41 → 2,439													
<u>7,85.10⁻³ ← 127,439</u>													

Tableau 18 : (Suite)

Fauts en F_8		Fauts en F_9		Fauts en F_{10}		Fauts en F_{11}		Fauts en F_{12}		Fauts en F_{13}		Fauts en F_{14}	
R	R^{-1}	R	R^{-1}	R	R^{-1}	R	R^{-1}	R	R^{-1}	R	R^{-1}	R	R^{-1}
0,384													
<u>4,298.10⁻³</u>		<u><u>1,03.10⁻³</u></u>		1,03.10 ⁻³		1,03.10 ⁻³		2,436.10 ⁻³		4,780.10 ⁻³		2,436.10 ⁻³	
0,389 → 2,51				11,4.10 ⁻³		1,406.10 ⁻³		2,344.10 ⁻³		0,015		0,126	
0,0125 → 80				<u>12,43.10⁻³</u>		<u>2,436.10⁻³</u>		<u>4,780.10⁻³</u>		<u>0,020</u>		<u>0,128</u>	
0,012 ← 82,511													
<u>3,375.10⁻⁴</u>													
0,013 → 76,92													
1,123.10 ⁻³ → 890,5													
<u>1,03.10⁻³</u> ← 967,42													

- 92 -

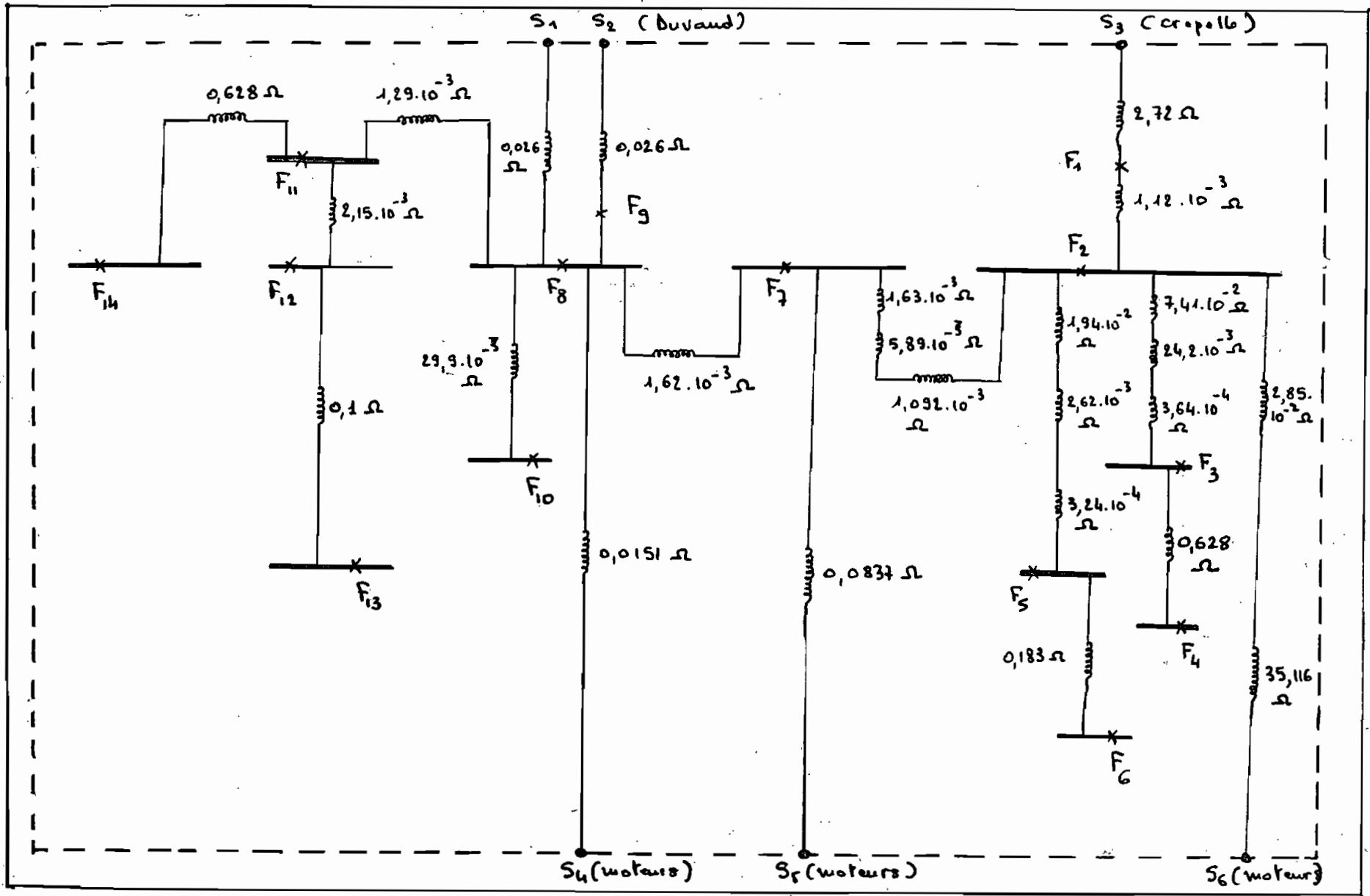


Fig 22 : schéma équivalent des réactances
(mode 2)

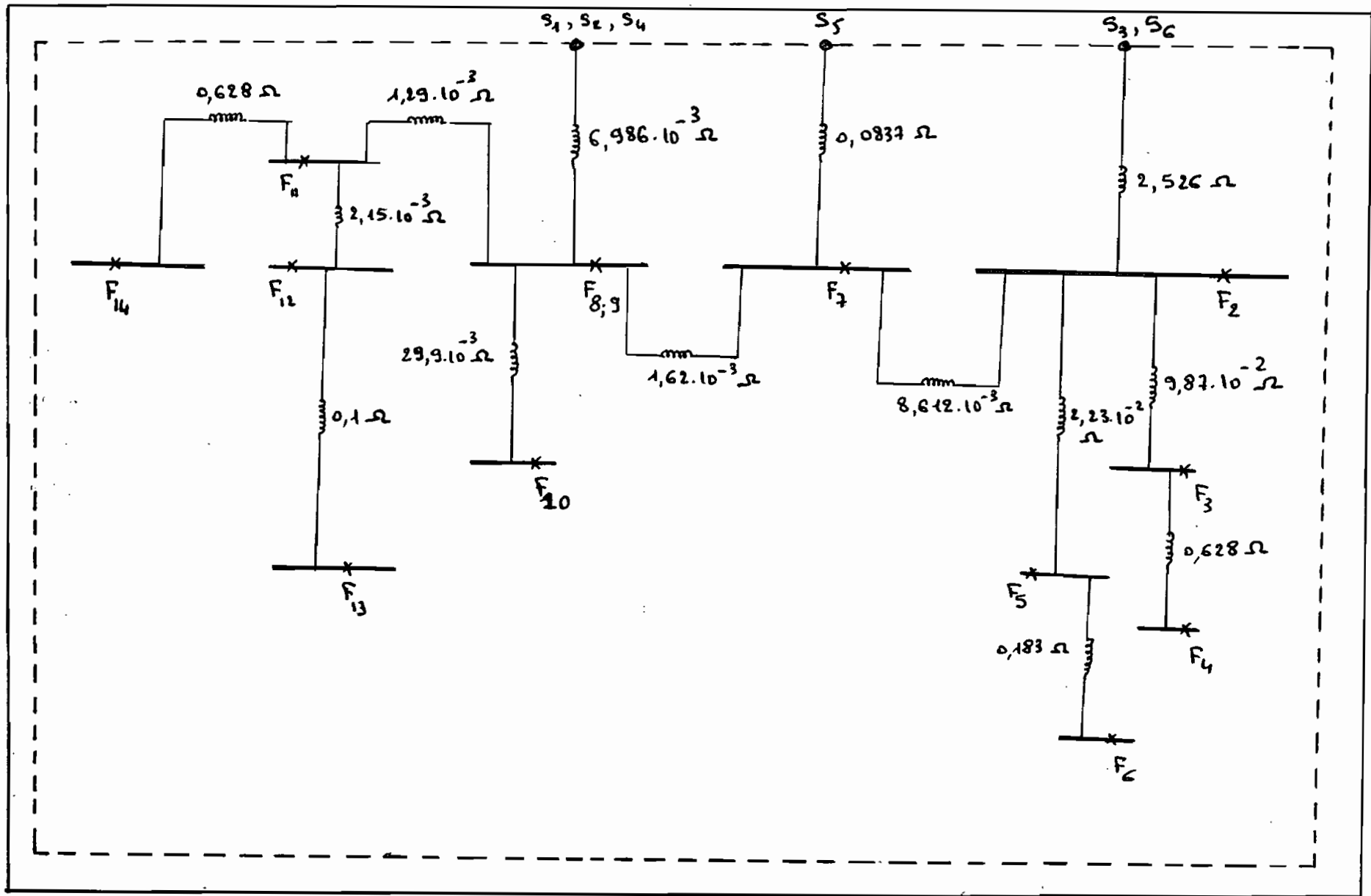


fig 23 : schéma équivalent simplifié des réactances
(mode 2)

Tableau 19 : Détermination de X aux différents points de faute (mode 2)

Faute en F ₁		Faute en F ₂		Faute en F ₃		Faute en F ₄		Faute en F ₅		Faute en F ₆		Faute en F ₇	
X	X ⁻¹	X	X ⁻¹	X	X ⁻¹	X	X ⁻¹	X	X ⁻¹	X	X ⁻¹	X	X ⁻¹
6,986.10 ⁻³		6,986.10 ⁻³		0,016		0,115		0,016		0,038		0,016	
1,62.10 ⁻³		1,62.10 ⁻³		9,87.10 ⁻²		0,628		2,23.10 ⁻²		0,183		8,612.10 ⁻³	
<u>8,606.10⁻³ → 116,2</u>		<u>8,606.10⁻³ → 116,2</u>											
0,0839 → 11,95		0,0839 → 11,95		<u>0,115</u>		<u>0,743</u>		<u>0,038</u>		<u>0,221</u>		<u>0,025</u>	
<u>7,8.10⁻³ ← 128,15</u>		<u>7,8.10⁻³ ← 128,15</u>											
8,612.10 ⁻³		8,612.10 ⁻³											
0,016 → 62,5		0,016 → 62,5											
35,144 → 0,028		2,526 → 0,396											
0,016 ← 62,528		<u>0,016 ← 62,836</u>											
1,12.10 ⁻³													
0,017 → 58,82													
2,72 → 0,37													
<u>0,017 ← 59,19</u>													

Tableau 19 : (suite)

Faute en F_8		Faute en F_9		Faute en F_{10}		Faute en F_{11}		Faute en F_{12}		Faute en F_{13}		Faute en F_{14}	
X	x^{-1}	X	x^{-1}	X	x^{-1}	X	x^{-1}	X	x^{-1}	X	x^{-1}	X	x^{-1}
2,526													
$8,612 \cdot 10^{-3}$		<u><u>$6,438 \cdot 10^{-3}$</u></u>		$6,438 \cdot 10^{-3}$		$6,438 \cdot 10^{-3}$		$7,728 \cdot 10^{-3}$		$9,878 \cdot 10^{-3}$		$7,728 \cdot 10^{-3}$	
				$29,9 \cdot 10^{-3}$		$1,29 \cdot 10^{-3}$		$2,15 \cdot 10^{-3}$		0,1		$0,628$	
<u>2,535</u>	$\rightarrow 0,394$											<u>0,636</u>	
0,0837	$\rightarrow 11,95$			<u>0,036</u>		<u><u>$7,728 \cdot 10^{-3}$</u></u>		<u><u>$9,878 \cdot 10^{-3}$</u></u>		<u>0,110</u>			
0,081	$\leftarrow 12,344$												
$1,62 \cdot 10^{-3}$													
0,082	$\rightarrow 12,195$												
$6,836 \cdot 10^{-3}$	$\rightarrow 143,14$												
<u>$6,438 \cdot 10^{-3}$</u>	$\leftarrow 155,335$												

-96-

- 97 -

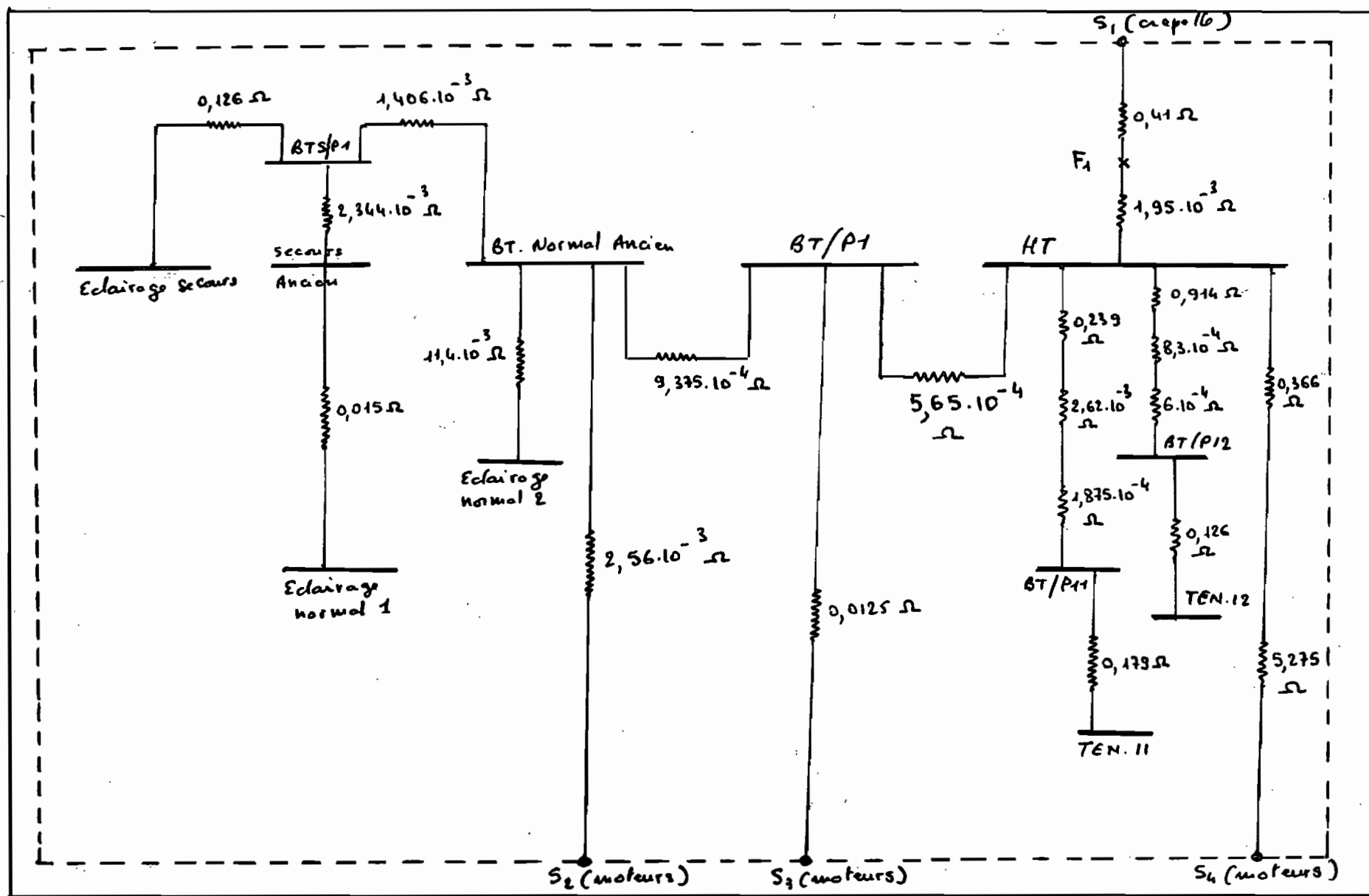


fig 24 : schéma équivalent des résistances
(mode 3)

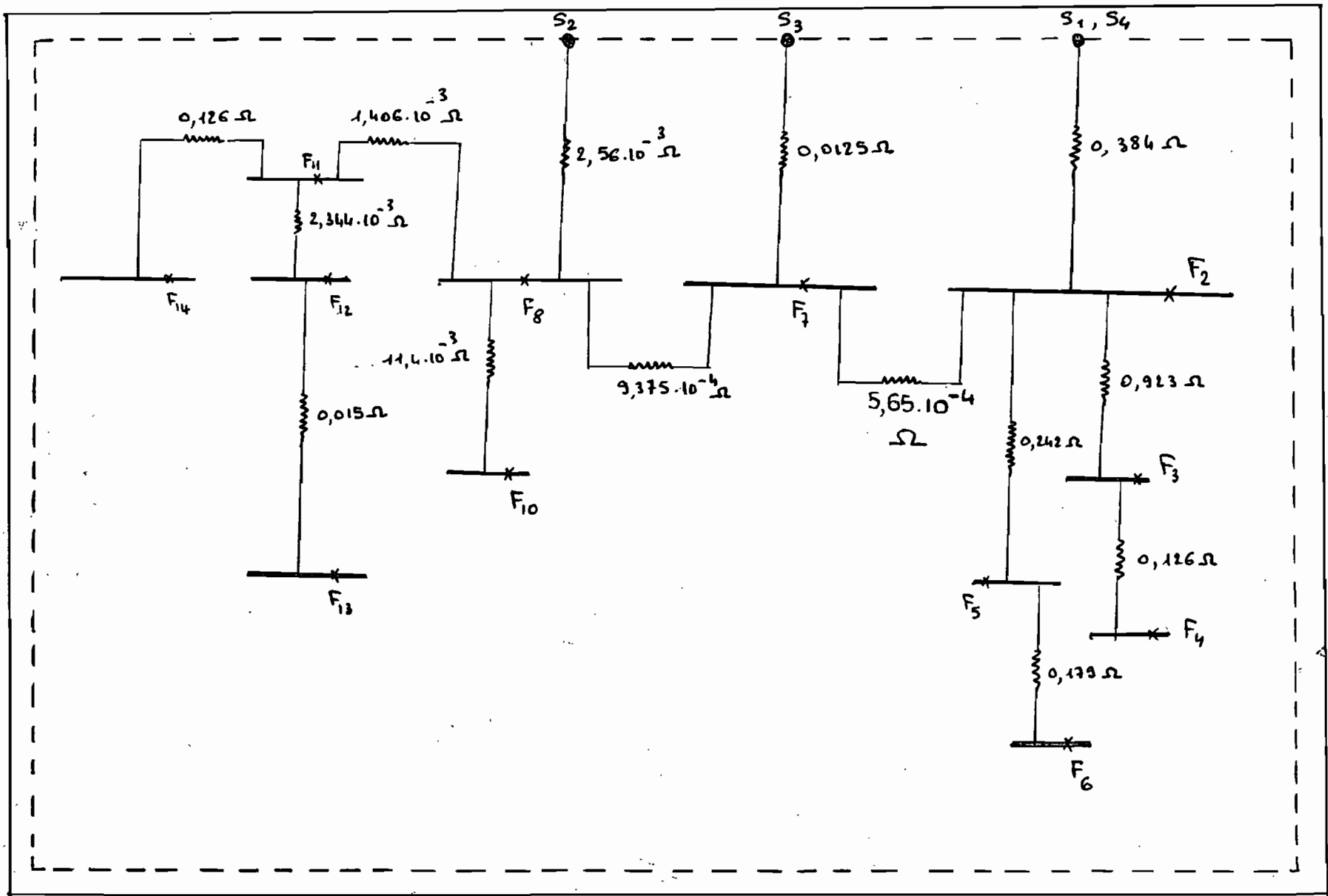


Fig 25: schéma équivalent simplifié des résistances
(mode 3)

Tableau 20 Détermination de R, aux différents points de court-circuit (mode 3)

Faute en F_1		Faute en F_2		Faute en F_3		Faute en F_4		Faute en F_5		Faute en F_6		Faute en F_7	
R	R^{-1}	R	R^{-1}	R	R^{-1}	R	R^{-1}	R	R^{-1}	R	R^{-1}	R	R^{-1}
$2,56 \cdot 10^{-3}$		2,56		$3,26 \cdot 10^{-3}$		0,926		$3,26 \cdot 10^{-3}$		0,245		$3,26 \cdot 10^{-3}$	
$9,375 \cdot 10^{-4}$		$9,375 \cdot 10^{-4}$		0,923		0,126		0,242		0,179		$56,5 \cdot 10^{-4}$	
$3,497 \cdot 10^{-3} \rightarrow 286$		$3,497 \cdot 10^{-3} \rightarrow 286$		<u>0,926</u>		<u>1,052</u>		<u>0,245</u>		<u>0,424</u>		<u>$3,82 \cdot 10^{-3}$</u>	
$0,0125 \rightarrow 80$		$0,0125 \rightarrow 80$											
$2,73 \cdot 10^{-3} \leftarrow 366$		$2,73 \cdot 10^{-3} \leftarrow 366$											
$5,65 \cdot 10^{-4}$		$5,65 \cdot 10^{-4}$											
$3,29 \cdot 10^{-3} \rightarrow 30$		$3,29 \cdot 10^{-3} \rightarrow 303,95$											
$5,641 \rightarrow 0,177$		$0,384 \rightarrow 2,604$											
$3,29 \cdot 10^{-3} \leftarrow 304,127$		<u>$3,26 \cdot 10^{-3} \leftarrow 306,554$</u>											
$1,95 \cdot 10^{-3}$													
$5,24 \cdot 10^{-3} \rightarrow 190,84$													
$0,41 \rightarrow 2,439$													
<u>$5,174 \cdot 10^{-3} \leftarrow 193,279$</u>													

Tableau 20 (Suite)

faute en F_8		faute en F_9		faute en F_{10}		faute en F_{11}		faute en F_{12}		faute en F_{13}		faute en F_{14}	
R	R^{-1}	R	R^{-1}	R	R^{-1}	R	R^{-1}	R	R^{-1}	R	R^{-1}	R	R^{-1}
$3,82 \cdot 10^{-3}$		-	-	$1,66 \cdot 10^{-3}$		$1,66 \cdot 10^{-3}$		$3,066 \cdot 10^{-3}$		$5,410 \cdot 10^{-3}$		$3,066 \cdot 10^{-3}$	
$9,375 \cdot 10^{-4}$				$11,4 \cdot 10^{-3}$		$1,406 \cdot 10^{-3}$		$2,344 \cdot 10^{-3}$		0,015		0,126	
<u>$4,76 \cdot 10^{-3}$</u>	$\rightarrow 210,08$			<u>$13,06 \cdot 10^{-3}$</u>		<u>$3,066 \cdot 10^{-3}$</u>		<u>$5,410 \cdot 10^{-3}$</u>		<u>0,024</u>		<u>0,129</u>	
$2,56 \cdot 10^{-3}$	$\rightarrow 390,62$												
<u>$1,66 \cdot 10^{-3}$</u>	$\leftarrow 600,70$												

- 100 -

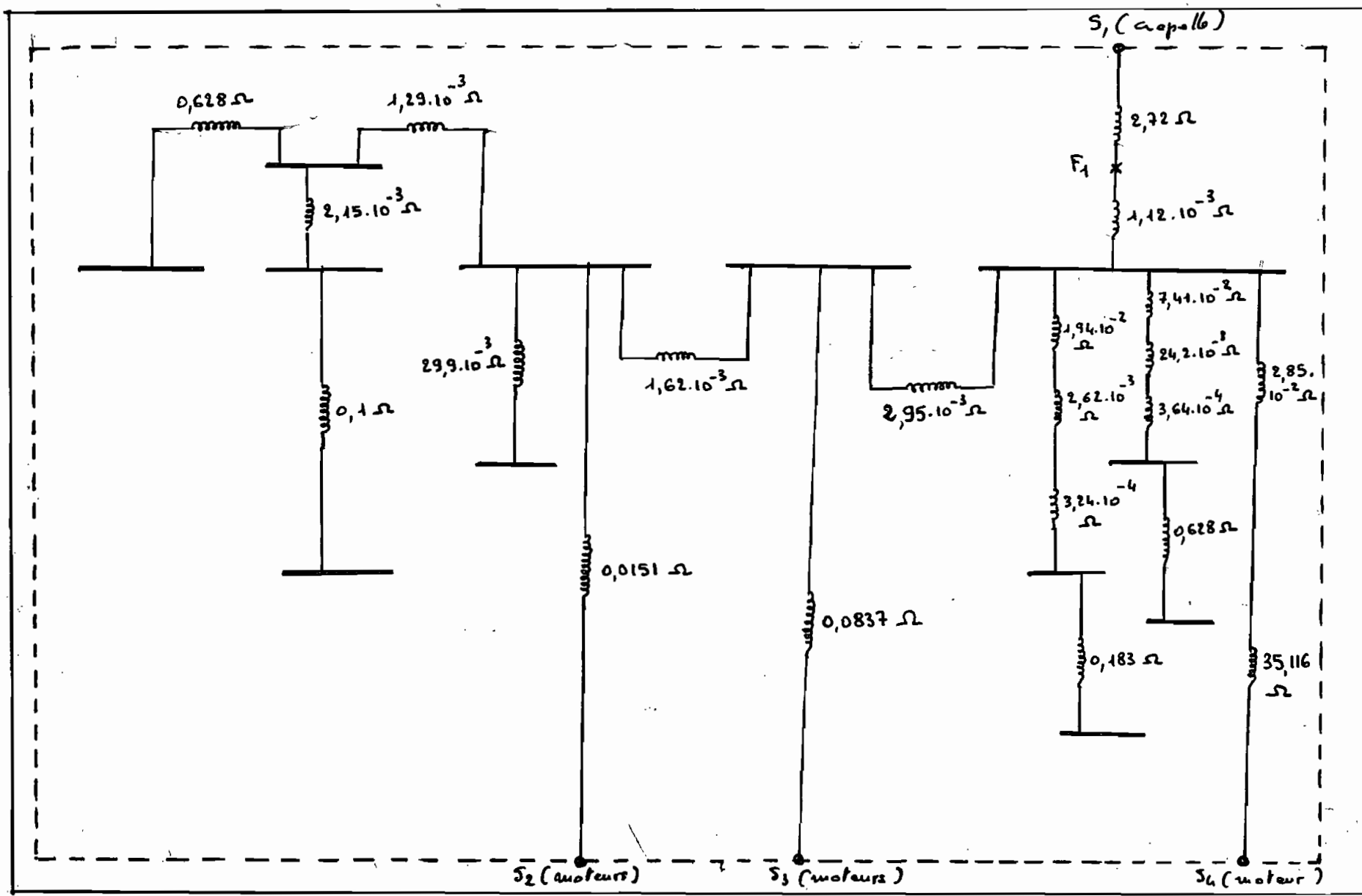


Fig 126: schéma équivalent des réactances
(mode 3)

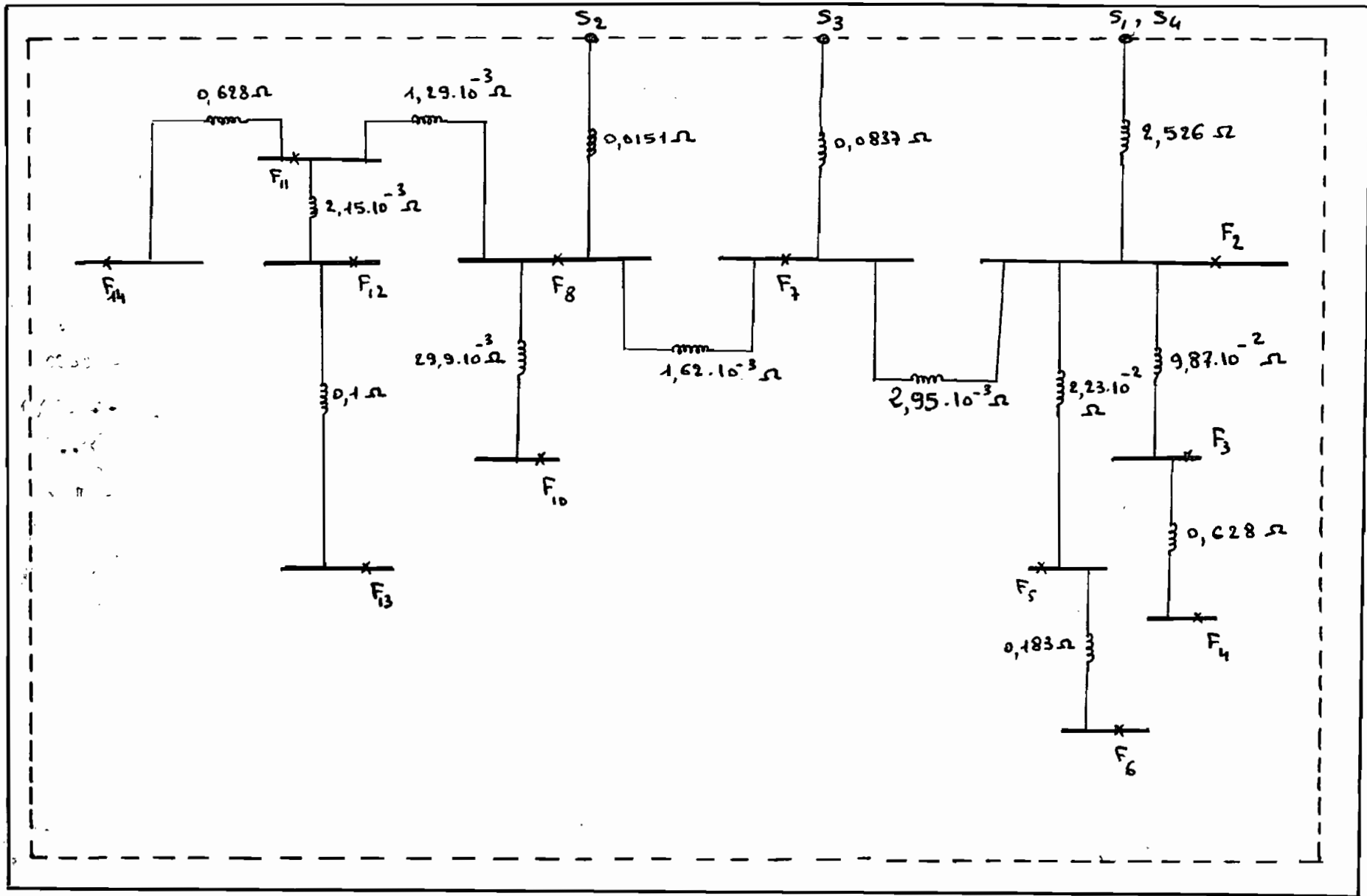


Fig. 27: schéma équivalent simplifié des réactances (mode 3).

Tableau 21: Détermination de X aux différents points de court-circuit (mode 3)

faute en F_1		faute en F_2		faute en F_3		faute en F_4		faute en F_5		faute en F_6		faute en F_7	
X	X^{-1}	X	X^{-1}	X	X^{-1}	X	X^{-1}	X	X^{-1}	X	X^{-1}	X	X^{-1}
0,0181		0,0151		0,017		0,116		0,017		0,039		0,017	
$1,62 \cdot 10^{-3}$		$1,62 \cdot 10^{-3}$		$9,87 \cdot 10^{-2}$		0,628		$2,23 \cdot 10^{-2}$		0,183		$2,95 \cdot 10^{-3}$	
<u>0,017</u>	$\rightarrow 58,82$	<u>0,017</u>	$\rightarrow 58,82$	<u>0,116</u>		<u>0,744</u>		<u>0,039</u>		<u>0,222</u>		<u>0,020</u>	
0,0837	$\rightarrow 11,95$	0,0837	$\rightarrow 11,95$										
<u>0,014</u>	$\leftarrow 70,77$	<u>0,014</u>	$\leftarrow 70,77$										
$2,95 \cdot 10^{-3}$		$2,95 \cdot 10^{-3}$											
<u>0,017</u>	$\rightarrow 58,82$	<u>0,017</u>	$\rightarrow 58,82$										
35,144	$\rightarrow 0,028$	2,526	$\rightarrow 0,39$										
<u>0,017</u>	$\leftarrow 58,848$	<u>0,017</u>	$\leftarrow 59,21$										
$1,12 \cdot 10^{-3}$													
<u>0,018</u>	$\rightarrow 55,56$												
2,72	$\rightarrow 0,37$												
<u>0,018</u>	$\leftarrow 55,93$												

Tableau 21: (Suite)

Fauts en F_8		Fauts en F_9		Fauts en F_{10}		Fauts en F_{11}		Fauts en F_{12}		Fauts en F_{13}		Fauts en F_{14}	
X	X^{-1}	X	X^{-1}	X	X^{-1}	X	X^{-1}	X	X^{-1}	X	X^{-1}	X	X^{-1}
2,526				0,013		0,013		0,014		0,016		0,014	
$2,95 \cdot 10^{-3}$				$29,9 \cdot 10^{-3}$		$1,29 \cdot 10^{-3}$		$2,15 \cdot 10^{-3}$		$2,15 \cdot 10^{-3}$		0,628	
<u>8,529</u> → 0,395				<u>0,043</u>		<u>0,014</u>		<u>0,016</u>		<u>0,116</u>		<u>0,642</u>	
0,0839 → 11,95													
0,081 → 12,345													
$1,62 \cdot 10^{-3}$													
0,083 → 12,05													
0,0151 → 66,22													
<u>0,013</u> → 78,27													

- 104 -

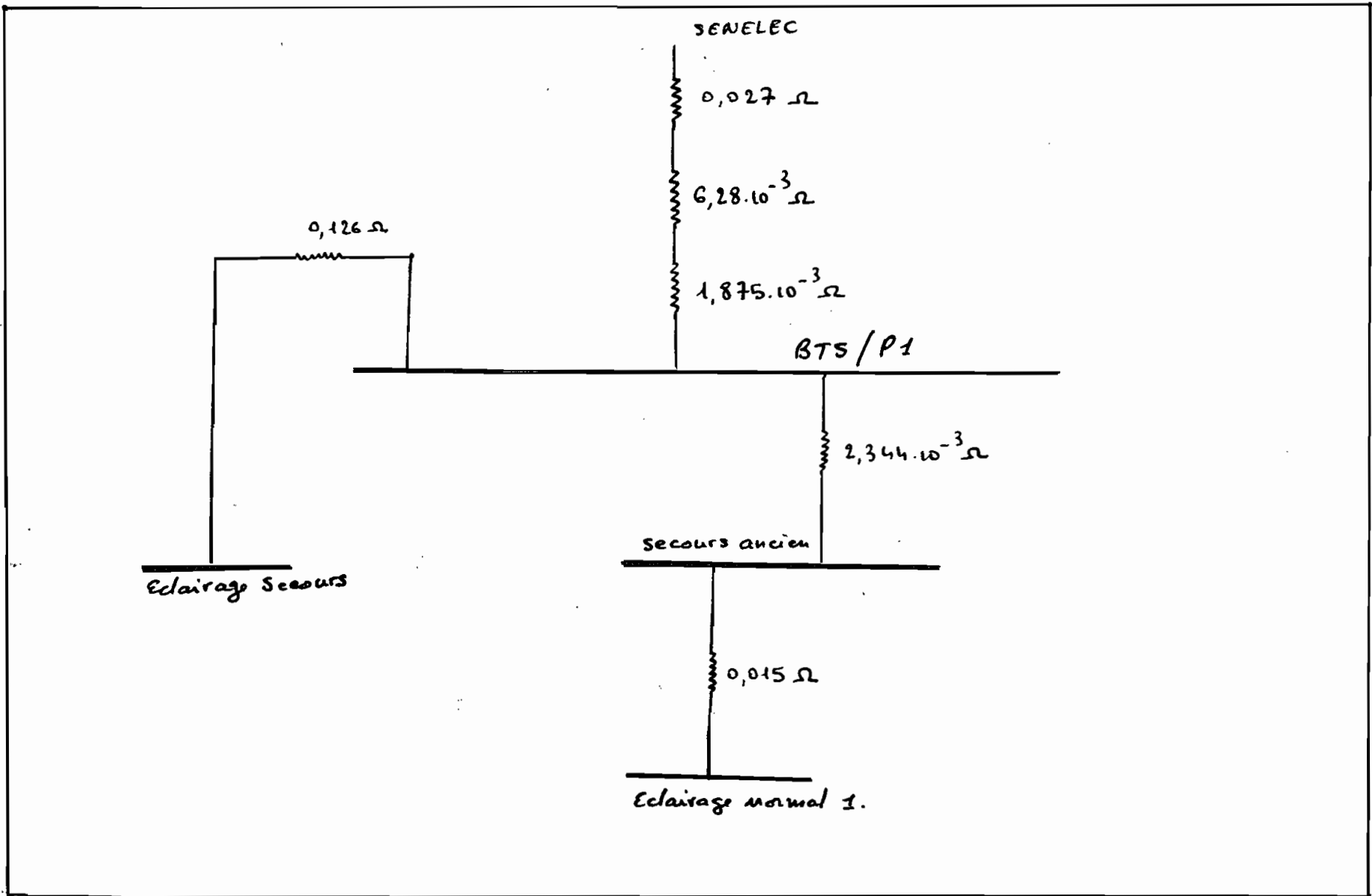


fig. 28 : schéma équivalent des résistances.
(mode 4)

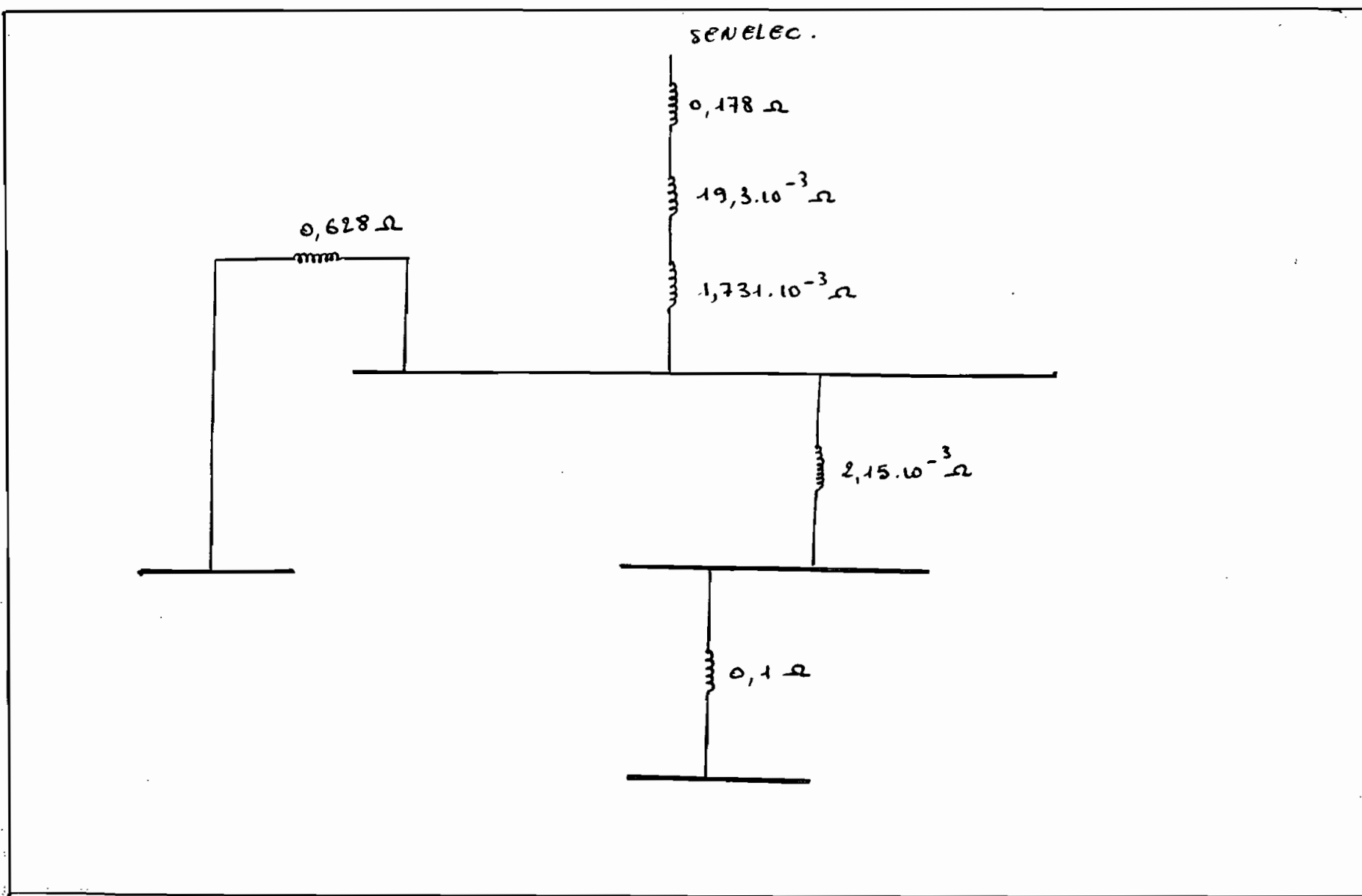


fig. 29: schéma équivalent des réactances
(mode 4)

Tableau 22: Détermination de R et X aux différents points de faute.
(mode 4)

Faute en F_{11}		Faute en F_{12}		Faute en F_{13}		Faute en F_{14}	
X	R	X	R	X	R	X	R
0,178	0,027	0,178	0,027	0,180	0,029	0,199	0,035
$19,3 \cdot 10^{-3}$	$6,28 \cdot 10^{-3}$	$2,15 \cdot 10^{-3}$	$2,344 \cdot 10^{-3}$	0,1	0,015	0,628	0,126
$1,731 \cdot 10^{-3}$	$1,875 \cdot 10^{-3}$						
<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>
0,199	0,035	0,180	0,029	0,280	0,044	0,827	0,161

III. 2.5 Etude de la selectivité

La coordination des protections sera examinée pour le circuit de la figure 14 (ie pour le mode projeté).

Nous proposons pour ce mode d'alimentation d'utiliser la 'selectivité' chronométrique parce qu'étant plus facile à réaliser. Les relais de tous les disjoncteurs, seront réglés au même courant $(I_{cc_{F_{13}}})_{\min}$ qui est égal à $I_{cc_{F_{13}}}/2$ puisque F_{13} est dans une zone correspondant au régime du neutre mis à la terre.

Nous avons trouvé que pour le mode 3, $I_{cc_{F_{13}}} = 2,034 \text{ kA}$
d'où $I_r = \frac{2,034 \text{ kA}}{2} = 1,017 \text{ kA}$

Disons $I_r = 1 \text{ kA}$.

Par ailleurs, dans ce mode de selectivité proposé il sera nécessaire de vérifier la stabilité thermique des câbles. Cette étude requiert, en plus des courbes de déclenchement des disjoncteurs, les temporisations des relais.

Tableau 23: Courants de service des câbles
(mode 1)

Câbles	Disjoncteurs Correspondants	Courants de Service I_b [A]
C_1	D_1 (HT1Q1)	202
C_7	D_7	131
C_8	D_8 (BTQ2)	2259
C_9 (cable de transfert)	D_9 (BTQ3)	1315
C_{10}	D_{10}	1216
C_{11}	D_{11}	264
C_{12}	D_{12}	175
C_{14}	D_{14}	187

Tableau 24: Courants de service des câbles
(mode 2)

Câbles	Disjoncteurs Correspondants	Courants de Service I_b [A]
C_1	D_1 (HT1Q1)	202
C_7	D_7	75
C_8	D_8 (BTQ2)	1286
C_9 (cable de transport)	D_9 (BTQ3)	342
C_{10}	D_{10}	1216
C_{11}	D_{11}	264
C_{12}	D_{12}	175
C_{14}	D_{14}	187

Tableau 25: Courants de service des câbles
(mode 3)

Câbles	Disjoncteurs Correspondants	Courant de service I_b [A]
C_1	D_1 (HT1Q1)	202
C_7	D_7	93
C_8	D_8 (BTQ2)	1617
C_9 (Cable de transfert)	D_9 (BTQ3)	2287
C_{11}	D_{11}	264
C_{12}	D_{12}	175
C_{14}	D_{14}	187

Tableau 26: Calcul de K et de $I_{cc_{max}}$ (mode 1)

localisation du défaut	R [Ω]	X [Ω]	R/X	K	I_{cc} [kA]	$I_{cc_{max}}$ [kA]
Faute en F_1	$8,154 \cdot 10^{-3}$	0,019	0,429	1,26	2,302	2,900
Faute en F_2	$6,266 \cdot 10^{-3}$	0,018	0,348	1,34	2,302	3,085
Faute en F_3	0,929	0,117	7,940	1	6,783	6,783
Faute en F_4	1,055	0,745	1,416	1,01	0,360	0,363
Faute en F_5	0,248	0,040	6,200	1	13,812	13,812
Faute en F_6	0,427	0,223	1,915	1	0,888	0,888
Faute en F_7	0,011	0,027	0,407	1,28	38,958	49,866
Faute en F_8	$1,39 \cdot 10^{-3}$	$8,56 \cdot 10^{-3}$	0,162	1,60	41,063	65,700
Faute en F_9	$1,39 \cdot 10^{-3}$	$8,56 \cdot 10^{-3}$	0,162	1,60	41,063	65,700
Faute en F_{10}	$12,79 \cdot 10^{-3}$	0,038	0,336	1,35	6,411	8,655
Faute en F_{11}	$2,79 \cdot 10^{-3}$	$9,85 \cdot 10^{-3}$	0,283	1,41	30,387	42,846
Faute en F_{12}	$5,13 \cdot 10^{-3}$	0,012	0,428	1,26	21,102	26,588
Faute en F_{13}	0,020	0,112	0,178	1,57	2,145	3,374
Faute en F_{14}	0,129	0,638	0,202	1,53	0,375	0,571

Tableau 27: Calcul de K et de I_{ccmax} (mode 2)

localisation du défaut	R [Ω]	X [Ω]	R/X	K	I_{cc} [kA]	I_{ccmax} [kA]
Faute en F ₁	$7,85 \cdot 10^{-3}$	0,017	0,462	1,23	2,430	2,989
Faute en F ₂	$5,97 \cdot 10^{-3}$	0,016	0,373	1,31	2,364	3,096
Faute en F ₃	0,929	0,115	8,078	1	6,813	6,813
Faute en F ₄	1,055	0,743	1,420	1,01	0,360	0,364
Faute en F ₅	0,248	0,038	6,526	1	13,939	13,939
Faute en F ₆	0,427	0,221	1,932	1	0,889	0,889
Faute en F ₇	0,010	0,025	0,400	1,28	44,686	57,198
Faute en F ₈	$1,03 \cdot 10^{-3}$	$6,438 \cdot 10^{-3}$	0,160	1,60	49,011	78,418
Faute en F ₉	$1,03 \cdot 10^{-3}$	$6,438 \cdot 10^{-3}$	0,160	1,60	49,011	78,418
Faute en F ₁₀	$12,43 \cdot 10^{-3}$	0,036	0,345	1,34	6,577	8,813
Faute en F ₁₁	$2,436 \cdot 10^{-3}$	$7,728 \cdot 10^{-3}$	0,315	1,37	34,530	47,306
Faute en F ₁₂	$4,780 \cdot 10^{-3}$	$9,878 \cdot 10^{-3}$	0,484	1,22	23,020	28,084
Faute en F ₁₃	0,020	0,110	0,182	1,56	2,167	3,380
Faute en F ₁₄	0,128	0,636	0,201	1,53	0,376	0,530

Tableau 28 : Calcul de K et de $I_{cc\max}$ (mode 3)

localisation du défaut	R [Ω]	X [Ω]	R/X	K	I_{cc} [kA]	$I_{cc\max}$ [kA]
Faute en F ₁	$5,174 \cdot 10^{-3}$	0,018	0,287	1,406	1,749	2,459
Faute en F ₂	$3,26 \cdot 10^{-3}$	0,017	0,192	1,547	1,715	2,653
Faute en F ₃	0,926	0,116	7,983	1	6,411	6,411
Faute en F ₄	1,052	0,744	1,414	1,012	0,358	0,362
Faute en F ₅	0,245	0,039	6,282	1	12,352	12,352
Faute en F ₆	0,424	0,222	1,910	1,002	0,882	0,884
Faute en F ₇	$3,820 \cdot 10^{-3}$	0,020	0,191	1,549	23,740	36,773
Faute en F ₈	$1,660 \cdot 10^{-3}$	0,013	0,128	1,669	19,732	32,933
Faute en F ₉	-	-	-	-	-	-
Faute en F ₁₀	$13,060 \cdot 10^{-3}$	0,043	0,304	1,385	5,116	7,086
Faute en F ₁₁	$3,066 \cdot 10^{-3}$	0,014	0,219	1,502	16,882	25,357
Faute en F ₁₂	$5,410 \cdot 10^{-3}$	0,016	0,338	1,346	13,566	18,260
Faute en F ₁₃	0,021	0,116	0,181	1,566	2,034	3,185
Faute en F ₁₄	0,129	0,642	0,201	1,532	0,371	0,508

Tableau 29: Calcul de R et de $I_{cc\max}$ (mode 4)

localisa. tion du défaut.	R [Ω]	X [Ω]	R/X	K	I_{cc} [kA]	$I_{cc\max}$ [kA]
Faute en F_{11}	0,035	0,199	0,176	1,58	10,197	16,111
Faute en F_{12}	0,029	0,180	0,161	1,60	8,885	14,216
Faute en F_{13}	0,044	0,280	0,157	1,61	1,885	3,035
Faute en F_{14}	0,161	0,827	0,195	1,54	0,366	0,564

Tableau 30 : Grandeurs déterminant les caractéristiques des disjoncteurs

Valeurs calculées guidant le choix des caractéristiques actuelles des disjoncteurs	I_b [A]			I_{cc} [kA]			I_{rm} [kA]		
	mode 1	mode 2	mode 3	mode 1	mode 2	mode 3	mode 1	mode 2	mode 3
D_1 (HT1Q1): Fluarc FG2. 630A	202	202	202	-	22,552	1,715	-	-	1
D_7 : Rollarc - R400D 315A	131	75	93	-	22,552	1,715	-	-	1
D_8 (BTQ2) DA. type : DSA1 cat. 3200A DITS : 8200A DIRS : 10kA	2259	1286	1617	-	22,552	23,740	-	-	1
D_9 (BTQ3) SELpact. DS2-12 DITS : 1000A DIRSA : 4 à 8 kA réglé à 6kA cat. : 4200A	1315	342	2287	-	22,552	23,740	-	-	1

- 914 -

Tableau 30 : (suite)

Valeurs calculées guidant le choix des caractéristiques techniques actuelles	I_b [A]			I_{cc} [kA]			I_{rm} [kA]		
	mode 1	mode 2	mode 3	mode 1	mode 2	mode 3	mode 1	mode 2	mode 3
D_{10} Selpact	1216	1216	-	-	28,941	-	-	-	1
D_{11} type: DS2. B6 cal: 630 A DITS: 630 A DIRSA: 2,5 à 5 kA réglé à 5 kA	264	264	264	-	34,530	16,882	-	-	1
D_{12} H500 cal. D320	175	175	175	-	34,530	16,882	-	-	1
D_{14}	187	187	187	-	23,020	13,566	-	-	1

- 117 -

Chapitre IV. Dimensionnement des Câbles.

Notre étude tient toujours compte des restrictions déjà mentionnées. Il s'agira de dimensionner les câbles C_1, C_7, C_8, C_9 (câble de transfert), C_{10}, C_{11}, C_{12} et C_{14} selon le mode 3.

Pendant le câble de transfert, C_9 , sera examiné, selon les trois modes.

La section minimum que l'on devra utiliser sera la plus grande valeur normalisée des trois suivantes:

S_j : section de phase due à l'intensité
(conditions de température)

S_z : section de phase due à la chute de tension

S_c : section de phase due au courant de court-circuit.

La section finale des câbles sera choisie de sorte à être un multiple de la section déjà existante, au lieu lui être supérieure. Ceci permettra d'utiliser le stock de câbles disponible au magasin et se passer ainsi d'une nouvelle commande.

IV.1 Caractéristiques des câbles

Câbles	Designation	Isolant	mode de pose	type de câble	longueur [m]
C ₁	HN 33-S-22	Polyéthylène haute densité	caniveaux fermés	unipolaire (Aluminium)	13
C ₄	HN 33-S-22	PVC	"	tripolaire (aluminium)	12
C ₈	U1000R02V	PR	"	unipolaire (cuivre)	23
C ₉ (câble de transfert)	U1000R02V	PR	"	unipolaire (cuivre)	20
C ₁₁	U1000R02V	PR	"	unipolaire (cuivre)	15
C ₁₂	U1000R02V	PR	"	unipolaire (cuivre)	25
C ₁₄	U1000R02V	PR	"	unipolaire (cuivre)	-

IV.2 Méthodes de Calcul :

1°) Détermination de S_j :

a. On calcule l'intensité de service I_b à transporter le câble

b. si les conditions propres à l'installation, sont différentes de celles précisées en bas des tableaux de caractéristiques donnant pour chaque câble les intensités maximales admissibles, on calcule le facteur de correction k à appliquer à l'intensité à transporter.

k est le produit des différents facteurs de correction intervenant. On distingue 6 facteurs de correction, mais dans notre cas nous sommes intéressés par les 3 qui sont :

k_1 : facteur de correction de température (cf. tableau A.1. Annexe) à appliquer pour tous câbles posés dans une température ambiante différente de :

20°C pour les câbles enterrés

30°C pour les câbles à l'air libre.

k_2 : facteur de correction en fonction du mode de pose à appliquer uniquement pour les câbles posés à l'air libre (cf. Tableau A.2. Annexe)

k_3 : facteur de "correction de proximité" à utiliser lorsque d'autres câbles sont posés à proximité de celui dont on veut

déterminer la section. On prendra $k_3 = 0,60$

c. On calcule l'intensité fictive qui est égale à $\frac{I_b}{k}$.

On recherche dans les tableaux des caractéristiques du câble (tableaux A.5 ou A.6. Annexe), la section S_j qui permet de transporter I_b ou le cas échéant l'intensité fictive $\frac{I_b}{k}$.
Les câbles sont supposés à champ radial.

2.) Détermination de S_z .

a. On détermine la chute de tension ΔU admissible par la liaison de longueur l

On admettra une chute de tension égale à un pourcentage de 3% de la tension du réseau pour canalisation d'éclairage et 5% de la tension du réseau pour canalisation de force motrice.

b. On détermine I_b .

c. On calcule l'impédance Z du câble à utiliser par la

formule

$$Z_{\max} = \frac{\Delta U_{\text{admissible}}}{\sqrt{3} \cdot I_b \cdot l} \cdot \begin{cases} \Delta U_{\text{adm}} = 19 \text{ V pour force motrice (380 V)} \\ \Delta U_{\text{adm}} = 6,6 \text{ V pour éclairage (220 V)} \end{cases}$$

$\Omega/\text{km} \qquad \qquad \qquad \text{A. km}$

d. On détermine le cos ϕ de l'installation (ici $\cos\phi = 0,8$)

e. On cherche dans le tableau A.3. Annexe la section S_z dont l'impédance pour le cos ϕ retenu est égale ou immédiatement inférieure à la valeur trouvée.

Remarque: Pour les câbles MT on ne s'intéresse pas à S_z
(faibles longueurs)

3-) Détermination de S_c .

On devra connaître :

- Niveau de tension du câble (MT ou BT)
- Courant de court-circuit dans le câble, I_{cc} en ampères.
- temps de court-circuit, t . (on suppose $t = 2s$)
- déterminer la densité de courant de court-circuit d selon tableau A.4. Annexe.
- Calculer S_c :

$$S_c = \frac{I_{cc}}{d} .$$

Tableau 31 : Détermination de S_j (mode 3)

Câbles	I_b [A]	k_1	k_2	k_3	k	$\frac{I_b}{k}$ [A]	S_j
C_4	202	0,90	0,70	0,60	0,38	532	1 x 240 ²
C_7	93	0,79	0,80	0,60	0,38	245	3 x 95 ²
C_8	1617	0,84	0,70	0,60	0,35	4620	9 câbles 1 x 300 ²
C_9 (cable de transfert)	2287	0,84	0,70	0,60	0,35	6535	13 câbles 1 x 240 ²
C_{11}	264	0,84	0,70	0,60	0,35	755	2 câbles 1 x 240 ²
C_{12}	175	0,84	0,70	0,60	0,35	500	1 cable 1 x 240 ²
C_{14}	187	0,84	0,70	0,60	0,35	535	1 cable 1 x 240 ²

Tableau 32: Détermination de S_z (mode 3)

Câbles*	l [km]	I_b [A]	Z_{max} [Ω /km]	S_z
C_8	0,023	1617	0,29	95^2
C_9 (cable de transfert)	0,020	2287	0,24	95^2
C_{11}	0,015	264	2,77	10^2
C_{12}	0,025	175	2,51	10^2
C_{14}	-	187	-	-

* Toutes les âmes sont en cuivre.

Tableau 33 : Détermination de S_c (mode 3)

câbles	I_{cc} [A]	d [A/mm ²]	S_c
C_1	1715	55	32^2
C_7	1715	52	33^2
C_8	23740	80	297^2
C_9 (câble de transport)	23740	80	212^2
C_{11}	16882	80	212^2
C_{12}	16882	80	212^2
C_{14}	13566	80	170^2

Tableau 34: Détermination de la section S_j du câble de transfert selon les autres modes (1 et 2)

modes	I_b [A]	k_1	k_2	k_3	k	$\frac{I_b}{k}$ [A]	S_j
mode 1	1315	0,84	0,70	0,60	0,35	3758	8 câbles 1×240^2
mode 2	342	0,84	0,70	0,60	0,35	978	2 câbles 1×240^2

Tableau 35 : Détermination de la section S_2
 du câble de transfert C_g selon les autres
 modes (1 et 2)

modes	l [kw]	I_b [A]	Z_{max} [Ω /kw]	S_2
mode 1	0,020	1315	0,42	50^2
mode 2	0,020	342	1,60	25^2

Tableau 36: Détermination de la section S_c du câble de transfert C_g selon les autres modes (1 et 2)

modes	I_{cc} [A]	d [A/mm ²]	S_c
mode 1	*	80	-
mode 2	22552	80	282 ²

* : Nous n'avons pas calculer I_{cc} au mode 1 car moins sévère que I_{cc} au mode 2.

Une comparaison de ces tableaux montre que la section due à l'interface (conditions de température), I_j , est plus grande que les autres.

Elle déterminera alors la section technique à choisir finalement pour les liaisons.

Une récapitulation est faite dans les tableaux 37 et 38.

130

Tableau 37: Section finale, S, des câbles (mode 3)

<div style="display: inline-block; transform: rotate(-45deg);"> Câbles \ sections </div>	S_j	S_z	S_c	S
C_1	1 x 240 ²	-	32 ²	2 x 240 ²
C_7	3 x 95 ²	-	33 ²	3 x 95 ²
C_8	8 câbles 1 x 300 ²	95 ²	297 ²	8 câbles 1 x 300 ²
C_{11}	2 câbles 1 x 240 ²	10 ²	212 ²	2 câbles 1 x 240 ²
C_{12}	1 câble 1 x 240 ²	10 ²	212 ²	1 câble 1 x 240 ²
C_{14}	1 câble 1 x 240 ²	-	170 ²	1 câble 1 x 240 ²

Tableau 38 : Section finale S du câble de transfert C_3 selon les différents modes (1, 2 et 3)

Section Modes	S_j	S_z	S_c	S
mode 1	8 câbles 1×240^2 (3 câbles 1×240^2)	50^2	-	8 câbles 1×240^2 (3 câbles 1×240^2)
mode 2	2 câbles 1×240^2 (1 câble 1×240^2)	25^2	282^2	2 câbles 1×240^2 (1 câble 1×240^2)
mode 3	13 câbles 1×240^2 (5 câbles 1×240^2)	95^2	212^2	13 câbles 1×240^2 (5 câbles 1×240^2)

- les valeurs entre parenthèses correspondent au mode de pose sur chemin de câble

Chapitre V : Conclusions et Recommandations

1. Sortir le câble de transfert du caniveau et le mettre sur chemin de câble.
2. Utiliser les groupes Diesel Duvand ou compensateurs synchrones et alimenter l'usine par un seul Crepelle ; dès lors :
 - 2.1. Acheter un transfo TR1.N équipé de 800 kVA pour l'utiliser avec le transfo TR1 de 1600 kVA existant (fig. 2)
 - 2.2. Transférer des charges de BT/P1 à BT/P1 N de manière à ne pas surcharger ces transfos
 - 2.3. Remplacer le câble de transfert par 13 câbles 1×240^2 U1000 R02V par phase s'il est maintenu dans le caniveau et par 5 câbles 1×240^2 s'il est seul sur chemin de câble.
 - 2.4. Choisir les disjoncteurs nécessaires selon tableau 30.
3. Faire des mesures d'intensité de courant sur les feeders pour confirmer la conclusion 2.
4. Doter le câble de transfert d'un sectionneur (400V ;

2500 A) et choisir sa section conformément au tableau 38.

Le sectionneur devra être installé du côté du tableau BT normal ancien (modes 1 et 2 seulement)

5. Relever toutes les caractéristiques des disjoncteurs et de leur relais pour étudier la protection et la stabilité thermique des câbles.

6. Étudier le facteur de puissance de l'usine pour réaliser des économies par réduction des pertes d'énergie, des chutes de tension et par augmentation de la capacité des câbles, des transformateurs et des alternateurs.

ANNEXES

Tableau A.1

FACTEUR DE CORRECTION k_1
pour câbles posés dans une température ambiante différente

- de 20 °C pour les câbles enterrés
- de 30 °C pour les câbles à l'air libre.

Température ambiante	Câbles Basse Tension			Câbles Moyenne Tension		
	isolés au Caoutchouc	PVC	PR	isolés au Polyéthylène lame A 70°C	isolés au Polyéthylène haute densité lame A 80°C	PR

CÂBLES ENTERRÉS						
10 °C	1,12	1,09	1,07	1,09	1,08	1,06
15 °C	1,06	1,05	1,04	1,05	1,04	1,03
20 °C	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
25 °C	0,93	0,95	0,96	0,95	0,96	0,95
30 °C	0,86	0,89	0,92	0,89	0,91	0,92
35 °C	0,79	0,84	0,88	0,84	0,86	0,88

CÂBLES À L'AIR LIBRE						
10 °C	1,29	1,22	1,17	1,22	1,18	1,15
15 °C	1,22	1,17	1,13	1,17	1,14	1,11
20 °C	1,15	1,12	1,09	1,12	1,1	1,08
25 °C	1,08	1,06	1,04	1,06	1,05	1,04
30 °C	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
35 °C	0,91	0,94	0,95	0,94	0,95	0,95
40 °C	0,82	0,87	0,91	0,87	0,9	0,91
45 °C	0,71	0,79	0,85	0,79	0,84	0,96
50 °C	0,58	0,71	0,80	0,71	0,77	0,91
60 °C	—	0,50	0,67	0,50	0,63	0,70
70 °C	—	—	0,52	—	—	0,57

Tableau A2 :

FACTEUR DE CORRECTION k_2
 en fonction du mode de pose des câbles posés à l'air libre

MODE DE POSE	FACTEUR DE CORRECTION k_2	
	Câbles multi-pôles	Câbles unif-pôles
<ul style="list-style-type: none"> • Câbles • fixés aux parois et plafonds • posés sur chemins de câble, tablettes, corbeaux 	1,00	1,00
<ul style="list-style-type: none"> • Câbles • posés en gouttières 	1,00	0,90
<ul style="list-style-type: none"> • Câbles • posés dans les huisseries 	1,00	0,90
<ul style="list-style-type: none"> • Câbles • posés sous conduits apparents, encastrés sous moulure et plinthe • posés en goulottes, gaine ou en caniveaux ouverts ou fermés • posés dans les vides de construction, alvéoles ou blocs alvéolés 	0,90	0,80
<ul style="list-style-type: none"> • Câbles • posés en conduits dans des caniveaux fermés ou ouverts 	0,80	0,70

Tableau A.3.

**IMPÉDANCE APPARENTE
DES CABLES BASSE TENSION : Choix de S_z**

Cables à âme cuivre			Sections NFC 37-013 mm ²	Cables à âme aluminium		
Impédance Cos φ = 0,3 Ω/km	Impédance Cos φ = 0,5 Ω/km	Impédance Cos φ = 0,8 Ω/km		Impédance Cos φ = 0,3 Ω/km	Impédance Cos φ = 0,5 Ω/km	Impédance Cos φ = 0,8 Ω/km
CABLES BASSE TENSION NON ARMÉS						
4,4	7,2	11,5	1,5	—	—	—
2,7	4,4	6,9	2,5	—	—	—
1,7	2,8	4,4	4	—	—	—
1,17	1,9	2,9	6	—	—	—
0,72	1,14	1,7	10	1,12	1,88	2,91
0,48	0,75	1,13	16	0,75	1,2	1,86
0,33	0,5	0,73	25	0,5	0,79	1,18
0,27	0,39	0,54	35	0,39	0,59	0,86
0,22	0,3	0,4	50	0,31	0,45	0,65
0,18	0,235	0,3	70	0,24	0,34	0,46
0,16	0,19	0,23	95	0,19	0,26	0,35
0,14	0,165	0,19	120	0,17	0,22	0,28
0,124	0,15	0,17	150	0,15	0,19	0,24
0,114	0,13	0,14	185	0,14	0,17	0,2
0,105	0,115	0,12	240	0,12	0,14	0,17
0,097	0,105	0,11	300	0,11	0,13	0,14
0,092	0,097	0,096	400	0,102	0,115	0,12
0,089	0,091	0,083	500	0,097	0,105	0,106
0,085	0,085	0,075	630	0,091	0,096	0,093
0,082	0,081	0,069	800	0,087	0,090	0,084
CABLES BASSE TENSION ARMÉS						
4,4	7,2	11,5	1,5	—	—	—
2,7	4,4	6,9	2,5	—	—	—
1,7	2,8	4,4	4	—	—	—
1,19	1,9	2,96	6	—	—	—
0,743	1,16	1,78	10	—	—	—
0,501	0,755	1,15	16	0,772	1,21	1,87
0,349	0,512	0,743	25	0,518	0,793	1,19
0,275	0,39	0,551	35	0,399	0,596	0,88
0,226	0,309	0,421	50	0,316	0,46	0,662
0,183	0,239	0,309	70	0,245	0,342	0,475
0,165	0,192	0,237	95	0,2	0,268	0,358
0,141	0,169	0,2	120	0,176	0,228	0,295
0,13	0,152	0,172	160	0,159	0,2	0,25
0,122	0,138	0,15	185	0,145	0,176	0,211
0,114	0,129	0,128	240	0,131	0,153	0,174
0,109	0,115	0,114	300	0,117	0,135	0,147
0,1	0,105	0,102	400	0,110	0,122	0,128
0,097	0,1	0,094	500	0,105	0,113	0,113

Tableau A.4

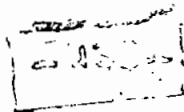
Tableau des densités de courant admissibles dans les câbles : d.

Durée de la surcharge* (en secondes)	Densité de courant : d			
	0,2 A/mm ²	0,5 A/mm ²	1 A/mm ²	2 A/mm ²
AMES CUIVRE				
Câbles MT				
Isolation Papier imprégné câble chaud à 65 °C	244	154	103	77
» PVC » » 70 °C	250	158	105	79
» Polyéthylène haute densité (1) » » 80 °C	264	167	112	83
» PR-EPM-EPDM » » 90 °C	310	196	139	98
Câbles BT				
Isolation PVC câble chaud à 70 °C	220	140	92	71
» Caoutchouc » » 60 °C	291	183	117	90
» PR » » 85 °C	257	165	107	80
» Polychloroprène » » 75 °C	268	170	110	85
AMES ALUMINIUM				
Câbles MT				
Isolation Papier imprégné câble chaud à 65 °C	157	99	70	50
» PVC » » 70 °C	167	104	73	52
» Polyéthylène haute densité (1) » » 80 °C	174	110	78	55
» PR-EPM-EPDM » » 90 °C	205	129	91	66
Câbles BT				
Isolation PVC câble chaud à 70 °C	140	90	64	46
» Caoutchouc » » 60 °C	192	122	86	61
» PR » » 85 °C	168	106	75	53
» Polychloroprène » » 75 °C	178	112	79	56

(1) Densité de courant calculée pour la température maximale à l'âme de 180 °C

BIBLIOGRAPHIE

1. I.E.E.E.
Recommended Practice for Electric Power
Distribution for Industrial Plants
2. Westinghouse Electrical Transmission and Distribution
Reference Book
3. Standard Handbook for Electrical Engineering
D. Fink
4. Merlin Gerin, Guide de l'installation électrique
Janvier 82
5. Merlin Gerin, Guide d'utilisation des disjoncteurs BT
Décembre 82
6. Cl. Remond, L'équipement électrique des bâtiments,
Eyrolles, 1980



7. Notes de cours des professeurs Roger Martin

1985 - 1986

7. Tréficable Pirelli, câbles électriques, appareillages
catalogue 1983.