

U. S. T. A.

2^{ed.}

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DÉPARTEMENT D'ÉLECTRONIQUE ET D'ÉLECTROTECHNIQUE



ELECTRIFICATION DU TRAFIC FERROVIAIRE SUR LA LIGNE ALGER - THENIA



Proposé par :

J. Podoski

Professeur à l'E.N.P.A.

Étudié par :

Med. Ketel

Med. N. Mekidèche

U. S. T. A.

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DÉPARTEMENT D'ÉLECTRONIQUE ET D'ÉLECTROTECHNIQUE

PROJET DE FIN D'ÉTUDES

**ELECTRIFICATION DU TRAFIC
FERROVIAIRE SUR LA LIGNE
ALGER - THENIA**

Proposé par :

J. Podoski

Professeur à l'E.N.P.A.

Étudié par :

Med. Ketel

Med. N. Mekidèche

A MA CHERE MERE

A MON CHER PERE

M. N. MEKIDECHE

.....
...PAR MA SEULE FORCE,
CELE DU CARACTERE
JE JAILLIRAI DE L'HORIZONTALE
ET ME HISSERAI A LA HAUTEUR DES GEANTS.
.....SI DIEU LE VEUT.

A MON PERE ,

A MA MERE

A MES AMIS .

M. KETEL

S O M M A I R E

	<u>Pages</u>
I - <u>INTRODUCTION</u>	1
1.1. HISTORIQUE	1
1.2. AVANTAGES GENERAUX DE LA TRACTION ELECTRIQUE	2
II - <u>DONNEES DE BASE</u>	4
2.1. RESEAU	4
2.2. PREVISIONS DU TRAFIC VOYAGEURS - REGION D'ALGER	5
III - <u>COMPOSITION DES TRAINS</u>	9
3.1. VEHICULES POUR LE TRAFIC	9
IV - <u>PROGRAMME D'EXPLOITATION ET BESOIN EN VEHICULES</u>	15
4.1. CAPACITE D'UN TRAIN	15
4.2. PROGRAMME D'EXPLOITATION ET GRAPHIQUE DE MARCHE	17
4.3. BESOIN EN RAMES	21
V - <u>DETERMINATION DES BESOINS EN ENERGIE</u>	22
5.1. CONCEPTION DES ENGINES MOTEURS	22
5.2. CONSOMMATION D'UN TRAIN AU DEMARRAGE	24
5.3. CONSOMMATION D'ENERGIE	24
VI - <u>ELECTRIFICATION EN COURANT CONTINU</u>	27
6.1. CALCUL DES CHUTES DE TENSION DANS LA LIGNE DE CONTACT	27
6.2. CALCUL DES PUISSANCES DES SOUS-STATIONS	33
6.3. SOUS-STATION EN COURANT CONTINU	35
6.4. LA DISTRIBUTION AUX CATENAIRES	43
6.5. LES SERVICES AUXILIAIRES	46
6.6. AGENCEMENT GENERAL DES SOUS-STATIONS	46
6.7. EFFETS DE LA TRACTION ELECTRIQUE SUR LES CANALISATIONS ET LES LIGNES DE TELECOMMUNICATIONS VOISINES	48

	<u>Pages</u>
VII - <u>SOUS-STATIONS EN COURANT 25 kV 50 Hz</u>	49
7.1. GENERALITES ET ALIMENTATION H.T.	49
7.2. EMPLOI DE TRANSFORMATEURS SPECIAUX ET MONOPHASES	50
7.3. NOMBRE ET LOCALISATION DES SOUS-STATIONS	52
7.4. CHUTES DE TENSION EN COURANT ALTERNATIF	54
7.5. CALCUL DE LA CONSOMMATION TOTALE	55
7.6. CONCLUSION, CHOIX DE LA VARIANTE ET DE LA PUISSANCE DES TRANSFORMATEURS	59
7.7. CONSTITUTION ET BRANCHEMENT	60
7.8. INSTALLATIONS AUXILIAIRES	64
7.9. VERIFICATION DE LA ZONE D'ALIMENTATION	64
7.10. PROTECTION DES TRANSFORMATEURS	65
IIX - <u>VUE D'ENSEMBLE DES MODES D'INFLUENCE EN COURANT ALTERNATIF</u>	66
8.1. GENERALITES	66
8.2. INFLUENCE CAPACITIVE	66
8.3. INFLUENCE INDUCTIVE	67
8.4. INFLUENCE OHMIQUE	67
8.5. SOLUTION PROPOSEE	67
IX - <u>SERVICE AUTOMATIQUE DE LA SOUS-STATION</u>	68
9.1. GENERALITES	68
X - <u>COMPARAISON ENTRE LES MODES DE TRACTION ET CONCLUSION</u>	69
10.1. COMPARAISON ENTRE LES DEUX MODES DE TRACTION	69
10.2. CONCLUSION	70
ANNEXE I	71
ANNEXE II	74

I - I N T R O D U C T I O N

1.1. HISTORIQUE

La deuxième moitié du XIXe siècle fut la grande période du développement du chemin de fer qui se termina au début de ce siècle par la réalisation de sa forme urbaine la plus élaborée : le M E T R O.

Les deux grands systèmes classiques utilisés pour la traction électrique avant 1950 dans le monde étaient :

- le courant continu pour des tensions de 700 V - 1 500 V et 3 000 V ;
- le courant monophasé 16 2/3 Hz pour les tensions 12 000 V à 15 000 V.

Mais ces tensions d'utilisation relativement faibles entraînaient, pour réduire les chutes de tension, l'utilisation d'une caténaire de grosse section et de points d'alimentation assez rapprochés (environ 8 km pour le 1 500 V) conduisant à la construction de lignes haute tension tout au long des voies pour raccorder les points d'alimentation au réseau national.

Le choix du courant alternatif dans certains pays d'Europe Centrale permettait, avec un simple transformateur sur la locomotive, de choisir une tension élevée pour la ligne de contact.

La caténaire s'allège alors considérablement, les sous-stations se réduisent à de simples postes de transformation et peuvent être espacées de 30 km environ.

En revanche, gênés par les problèmes de commutation du moteur de traction, et en l'absence de convertisseur de courant, suffisamment légers, ces pays n'avaient pu adopter la fréquence industrielle de 50 Hz, et ils s'étaient rabattus sur une fréquence spéciale, le tiers de la fréquence industrielle : 16 2/3 Hz. Cela imposait au chemin de fer un réseau spécial de production et de transport d'énergie.

La solution la plus intéressante était celle qui aurait permis de concilier les avantages d'une caténaire légère d'un moteur de traction du type "série" alimenté en courant continu ou, à proprement parlé, ondulé, pouvant être utilisé sur la fréquence industrielle.

A l'heure actuelle, l'électrification se fait en 25 kV 50 Hz ou en 3 kV en continu. Le courant monophasé 16 2/3 Hz n'est utilisé qu'en Europe Centrale, tandis que le continu 1 500 V (France) tend à disparaître.

1.2. AVANTAGES GENERAUX DE LA TRACTION ELECTRIQUE

Le choix de la traction électrique est dicté essentiellement par les conditions économiques : coût de la main-d'oeuvre, prix des différentes formes d'énergie. L'électrification permet de puiser une part importante de l'énergie de traction à des sources nationales : forces vives des cours d'eau, gaz naturel, dont l'avenir est certain et prometteur pour notre pays.

La traction électrique permet la qualité du service offert. De ce dernier point de vue, elle se montre la plus intéressante en raison des avantages techniques suivants :

a) Puissance :

Seuls le poids total d'un engin moteur et l'effort possible de traction par le poids adhérent, limitent la puissance installée.

b) Capacité de surcharges

Un moteur électrique à l'avantage de supporter des surcharges importantes (50 à 100 %) d'autant plus élevées que leur durée est plus courte et que le moteur est initialement à température plus basse. Ce qui pour un moteur diesel se traduit par des frais d'entretien importants.

c) Grandes vitesses

Indiscutablement, la traction électrique dans le domaine des grandes vitesses, surclasse et de loin les autres modes de traction, grâce à la puissance massique de ses locomotives.

d) Souplesse d'exploitation

Les problèmes de chargement en combustible sont supprimés, l'immobilisation pour l'entretien courant est faible.

e) Régularité

La régularité du service qu'assure une locomotive électrique s'explique par sa capacité de fournir toute sa puissance et d'accepter des surcharges sans besoin d'entretien en période de marche.

f) Capacité

La capacité d'une ligne électrique augmente généralement de 30 à 100 % en raison de l'augmentation de la masse des trains et de leur vitesse commerciale.

g) Environnement

Pas de pollution ni par la fumée, ni par le bruit.

Enfin et à l'heure où l'énergie devient rare et chère, la traction électrique ferroviaire apparaît comme une solution économiquement imbattable. A la condition toutefois que le trafic justifie, sur une liaison donnée, les investissements forcément élevés provoqués par l'électrification. En outre, les améliorations techniques qui sont les plus sensibles à l'utilisateur, la propreté, la régularité, la vitesse, sont données de surcroît.

II - D O N N E E S D E B A S E

2.1. RESEAU

La région du Grand Alger possède un réseau ferroviaire assez peu émaillé, constitué des tronçons suivants :

- TAFOURAH - HUSSEIN-DEY
- HUSSEIN-DEY - EL HARRACH
- HUSSEIN-DEY - AIN GHORB
- EL HARRACH - THENIA
- EL HARRACH - NADOR

ainsi que différentes bretelles (Voir Fig. n° 1)

Pour l'étude présente, notre choix s'est limité à la ligne TAFOURAH - THENIA, ceci vu l'importance de l'industrialisation de cette région. Fig n° 2 .

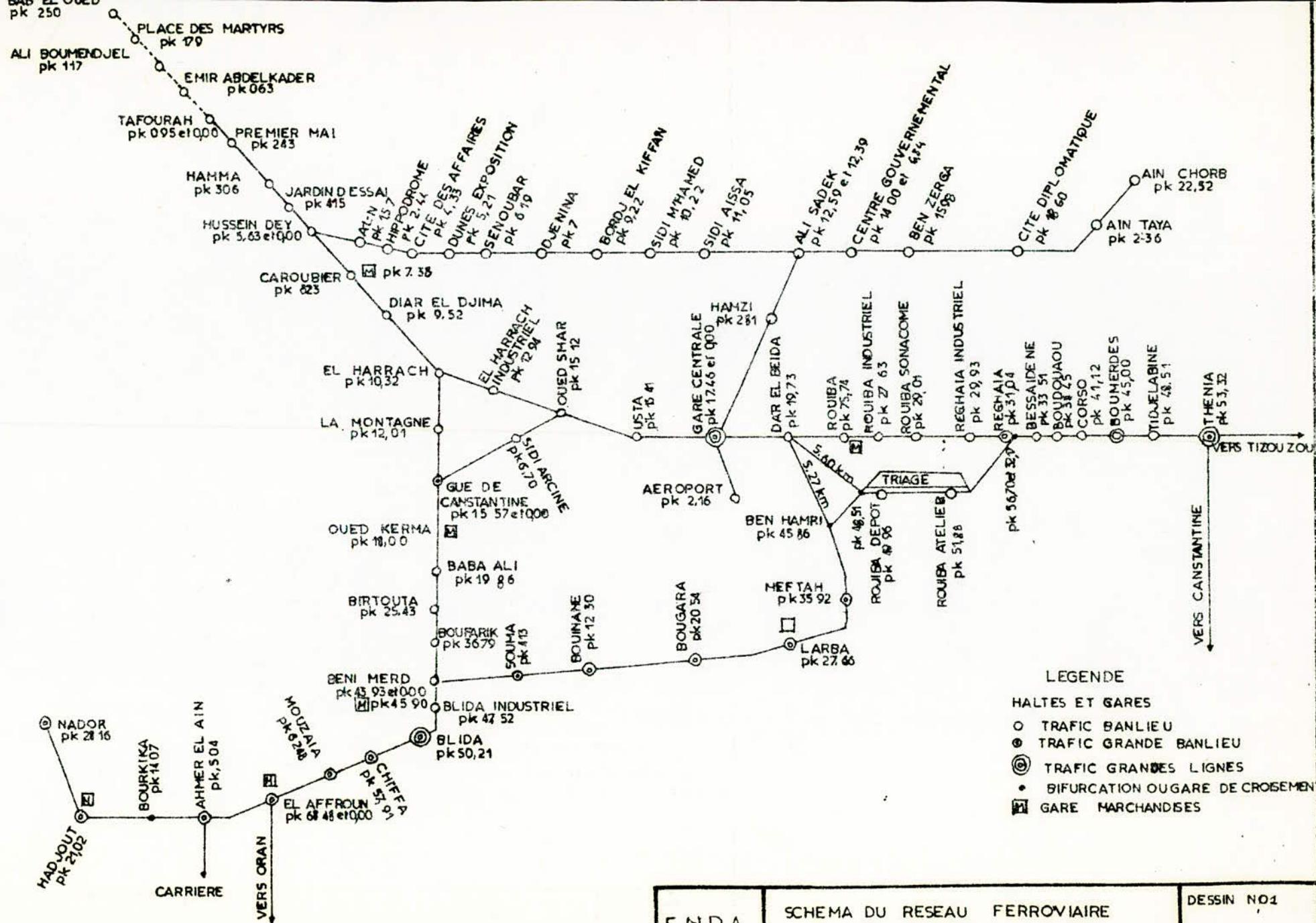
D'après le bureau d'exploitation des trains de la S. N. T. F., la ligne TAFOURAH - THENIA est à l'heure actuelle ainsi exploitée :

- * ligne TAFOURAH - EL HARRACH ~ 10 km.
- double voie entre TAFOURAH et AGHA et triple voie entre AGHA et EL HARRACH.

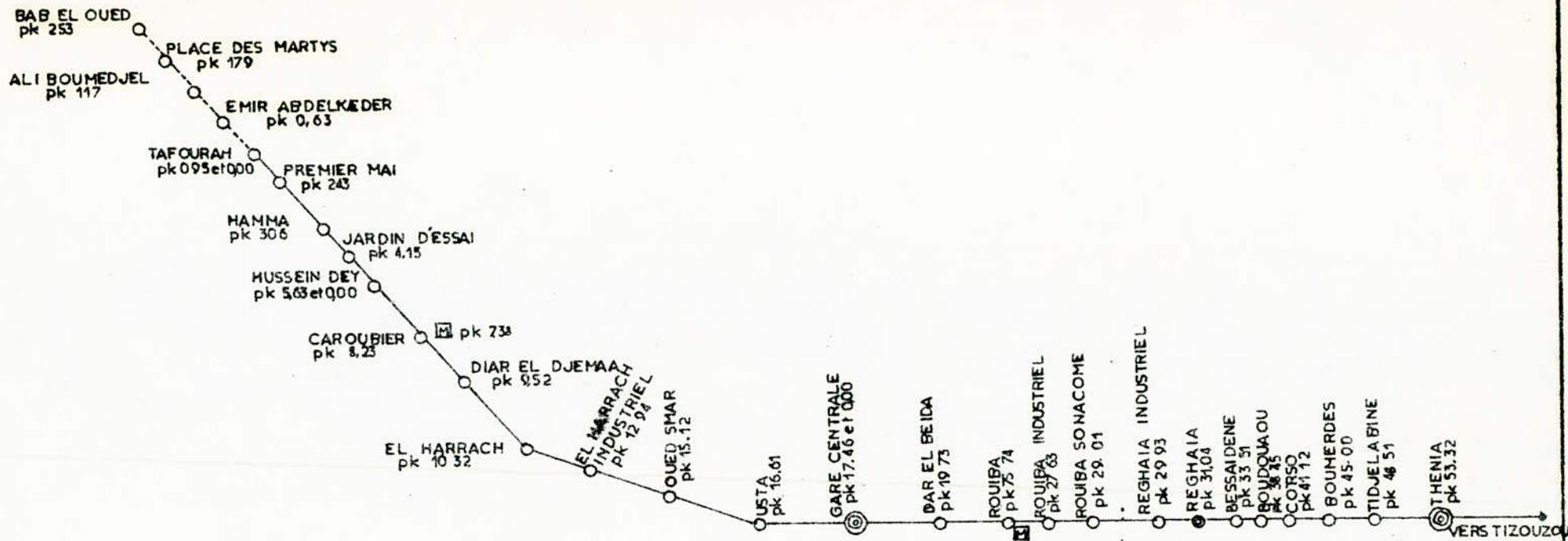
Le livret de la S. N. T. F. admet les vitesses-limites suivantes :

- | | |
|----------------------------|----------|
| - TAFOURAH - AGHA | 30 km/h |
| - AGHA - LES ATELIERS | 85 km/h |
| - ATELIERS - HUSSEIN-DEY | 100 km/h |
| - HUSSEIN-DEY - EL HARRACH | 75 km/h. |

Sur cette section de ligne circulent par jour selon l'horaire : 48 trains voyageurs et 8 trains pour étudiants entre ALGER - DAR EL BEIDA (sauf vacances).



E.N.P.A.	SCHEMA DU RESEAU FERROVIAIRE FUTUR DE LA REGION ALGEROISE	DESSIN NO 1
----------	--	-------------



LEGENDE

HALTES ET GARES

- TRAFIC BANLIEU
- ⊙ TRAFIC GRAN BANLIEU
- ⊙ TRAFIC GRANDES LIGNES
- BIFURCATION OU GARE DE CROISEMENT
- ⊞ GARE MARCHANDISES

E.N.P.A.

SCHEMA DU RESEAU FERROVIAIRE
A ELECTRIFIER

DESSIN NO2

* ligne EL HARRACH - THENIA ~ 43 km.

- section à double voie entre EL HARRACH et REGHAIA et
seulement à une voie entre REGHAIA et THENIA.

Le livret de la S. N. T. F. admet les vitesses-limites suivantes :

- EL HARRACH - km 11,3	75 km/h
- km 11,3 - CORSO	100 km/h
- CORSO - THENIA	85 km/h

Il y a 26 trains voyageurs par jour, il s'y ajoute les 8 trains pour étudiants de la section ALGER - DAR EL BEIDA.

Remarque :

En ce qui concerne le profil de la ligne, on a admis avec l'accord de la S. N. T. F. que d'ici l'An 2000, il y aura retraçage de la ligne dans une perspective droite (sans courbure) et avec des pentes négligeables.

2.2. PREVISIONS DU TRAFIC VOYAGEURS - REGION D'ALGER

2.2.1. Méthode appliquée pour établir les prévisions

L'An de référence est l'An 2000.

Aucune prévision particulière à l'horizon 2000 n'a été établie pour le trafic voyageurs banlieue et vu les lacunes en ce domaine, on a repris les résultats de l'étude "Transport ferroviaire de voyageurs dans la banlieue d'Alger" de la S. N. T. F. datant de l'année 1976, nous ne voulons que citer brièvement la méthode appliquée.

La base de départ constituant les données de structures selon COMEDOR (1) donc le découpage d'Alger selon l'importance de la population et le nombre d'emplois.

(1) COMEDOR : Comité d'Organisation et d'Urbanisation du Grand Alger.

Le découpage de la région du Grand Alger en 32 unités de comptage par COMEDOR a été aux fins de la détermination des prévisions du trafic voyageurs sur les lignes de banlieue de la S. N. T. F., modifié en 26 zones de trafic pour permettre de mieux tenir compte des exigences de l'établissement des prévisions pour le trafic voyageurs par chemin de fer.

La zone qui encercle la région du Grand Alger le long de la ligne ferroviaire existante a été découpée en deux zones à savoir MITIDJA SUD et ALGER EST.

Etant donné que les prévisions visent la période de pointe du matin, on a pris en considération les déplacements domicile - travail. Les prévisions ont été établies en quatre étapes : génération, distribution, répartition et affectation.

L'étude utilise un module mathématique de génération de trafic qui essaie de traduire le mieux possible la réalité. C'est ainsi qu'un certain nombre d'hypothèses fut admis et il a été fait usage de divers paramètres variables pour simuler le comportement des usagers.

Sans vouloir entrer en détails dans ce processus, on se bornera à admettre et utiliser les résultats obtenus qui sont les suivants :

GARES	ORIGINE	DESTINATION
Tafourah	18 500	10 500
Premier Mai	4 776	4 654
Hamma	3 617	3 927
Annasser	1 813	1 554
Hussein-Dey	784	1 244
Caroubier	588	926
Diar-el-Djemaa	1 744	229
El-Harrach	3 730	590
El-Harrach Industriel	1 023	2 152
Oued Esmar	1 023	2 152
U.S.T.A.	-	-
Gare centrale	247	157
Dar-el-Beida	4 063	1 707
Rouiba	1 489	210
Rouiba Industriel	-	3 959
Rouiba SONACOME	-	1 980
Reghaia Industriel	-	3 959
Reghaia	6 011	2 469
Boudouaou	65	74
Corso	488	552
Boumerdes	1 367	1 547
Tidjelabine	33	37
Thénia	1 500	1 300

Les résultats fournis nous ont servi à tracer le trafic voyageurs banlieue à l'heure de pointe du matin à l'An 2000 (Voir Fig. n° 3).

D'après ce graphique, on remarque que le tronçon le plus chargé est celui menant de OUED SMAR à DAR EL BEIDA (ce qui est normal vue l'importance de l'Université Houari Boumedienne) avec 28 400 voyageurs par heure de pointe.

Bien que ce chiffre nous semble un peu excessif, nous l'assumons car pour l'An 2000, il est important que les projets soient conformes à une seule source qui est le COMEDOR et sans autre considération, il sera la base de notre étude.

III - COMPOSITION DES TRAINS

3.1. VEHICULES POUR LE TRAFIC

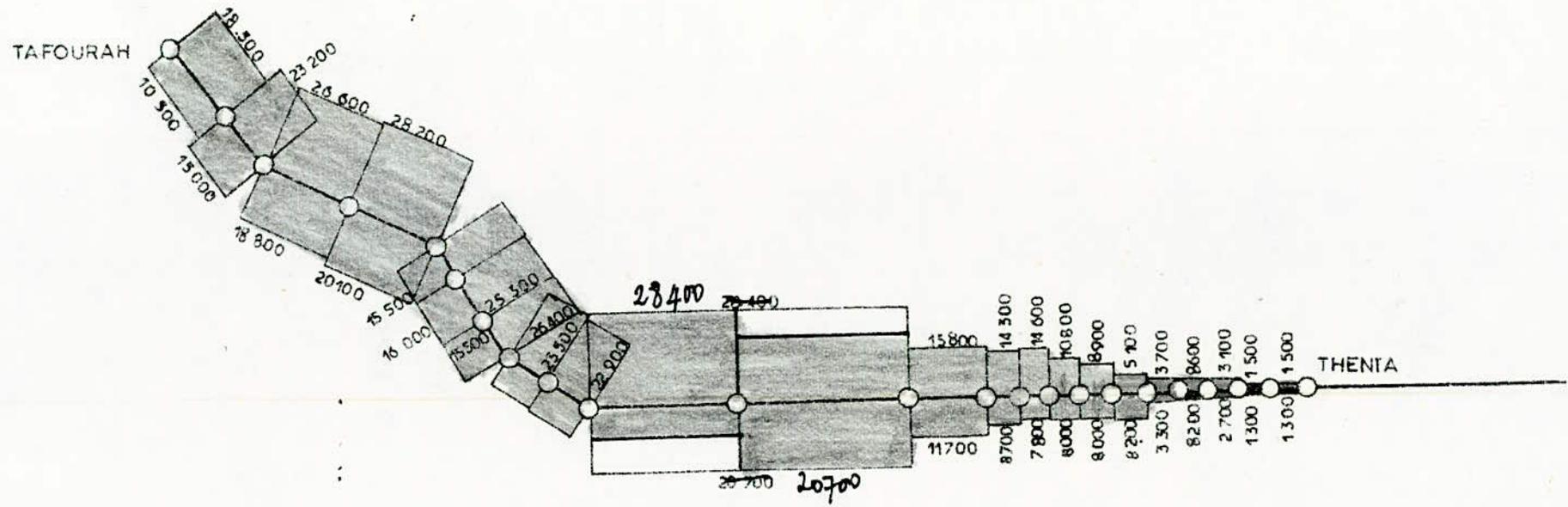
3.1.1. Généralités

Le rendement d'un système de transport de masse se détermine par la capacité des véhicules, la vitesse commerciale et la cadence de suivie des trains. La rentabilité est d'une influence décisive. Chacun des facteurs doit être étudié en rapport aux autres.

Afin de déterminer l'aménagement intérieur des véhicules, on doit mesurer le pour et le contre des exigences sur le plan du nombre d'usagers ou sur celui du confort.

Ce qui laisse résulter le dispositionnement des sièges, ainsi que le rapport entre places assises et places debout. C'est principalement sur le trafic banlieue que le nombre d'usagers varie très différemment que ce soit sur les divers tronçons de lignes et certaines heures. L'occupation des trains augmente en général à partir des secteurs extérieurs vers le centre-ville (comme on le verra sur le graphe n°3).

Pour les courts trajets, on profite dans la plus large mesure de l'espace des places debout. D'autre part, on devra offrir une place assise à l'usager qui prend le train chaque jour sur de longs trajets. Pour la mise en service de nos jours de voitures modernes pour trafic banlieue, on tient compte d'un rapport entre places assises et places debout : 1 : 2 jusqu'à 1 : 4. Les places debout se trouvent principalement aux emplacements d'accès qu'il faudra calculer en conséquent. Afin d'activer un rapide échange de voyageurs descendant et montant en voiture ; il faut prévoir autant que possible beaucoup de portes.



3.1.2. Voitures voyageurs

Dans la région algéroise, le trafic régional actuel se fait avec du matériel à voyageurs avec 3 portes de chaque côté. Ces voitures doivent être remplacées prochainement par une nouvelle série de voitures de type "banlieue". On part du principe que ce type ou un type similaire sera aussi utilisé pour le trafic en l'An 2000. En principe, on utilise les mêmes caisses pour les voitures motrices. Une extrémité de la voiture est équipée d'une cabine de conduite et il n'y a aucune possibilité de passage à cet endroit à une éventuelle voiture attelée.

3.1.3. Automotrices

En cas d'électrification du réseau du trafic banlieue, des rames à traction électrique, devront assurer le service. D'après les indications de la S. N. T. F., une accélération de démarrage de l'ordre de 0,5 m/s doit être considérée comme suffisante pour la région algéroise.

Pour notre cas, trois voitures constitueront une rame qui consistera en une voiture motrice et deux remorques. La seconde remorque est munie d'une cabine de commande qui permet de conduire la rame si la remorque se trouve en tête. L'appareillage électrique est souvent installé dans la voiture centrale pour obtenir une meilleure distribution des charges sur toutes les trois voitures.



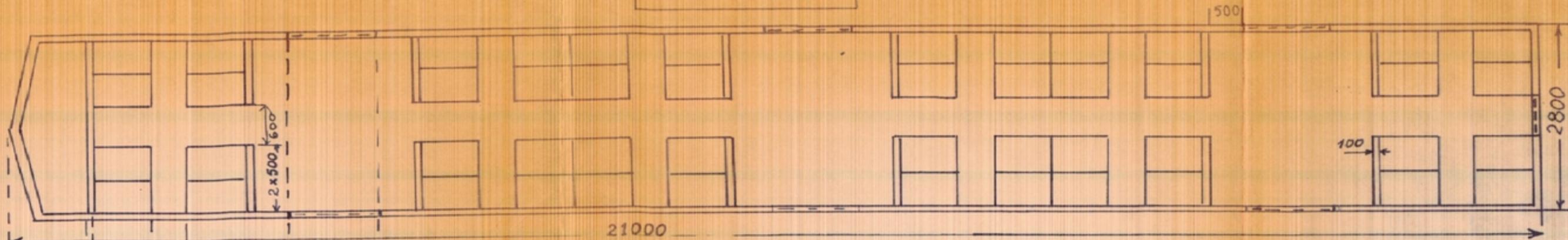
Une rame automotrice n'est divisible qu'en atelier. Un train peut être constitué d'une, deux ou trois rames, accouplées automatiquement et facilement divisibles. Un train est conduit en "commande multiple", d'une seule cabine de tête.

Pour la subdivision de l'espace intérieur, il a été réalisé 2 variantes de base qui sont déterminées par leur longueur hors tout (voir dessin page suivante). Les portes ont une longueur de 1,20 m. Une plus grande largeur ne serait pas rationnelle étant donné qu'avec trois portes la solidité de la caisse ne peut être garantie, qu'avec un coût de construction plus élevé.

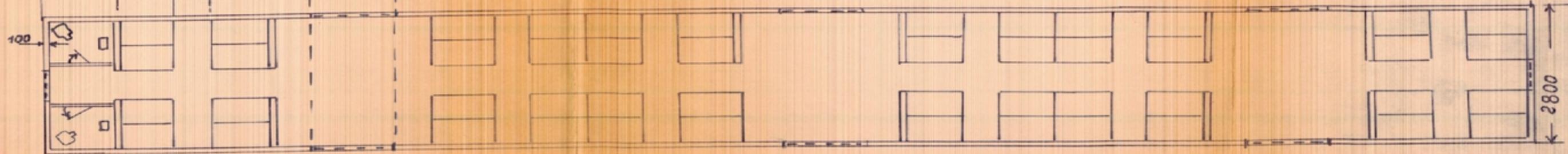
L'équipement électrique se compose de l'installation d'éclairage, de chauffage et de ventilation d'air ainsi que de l'équipement pour la traction électrique.

VARIANTE 1

(1)



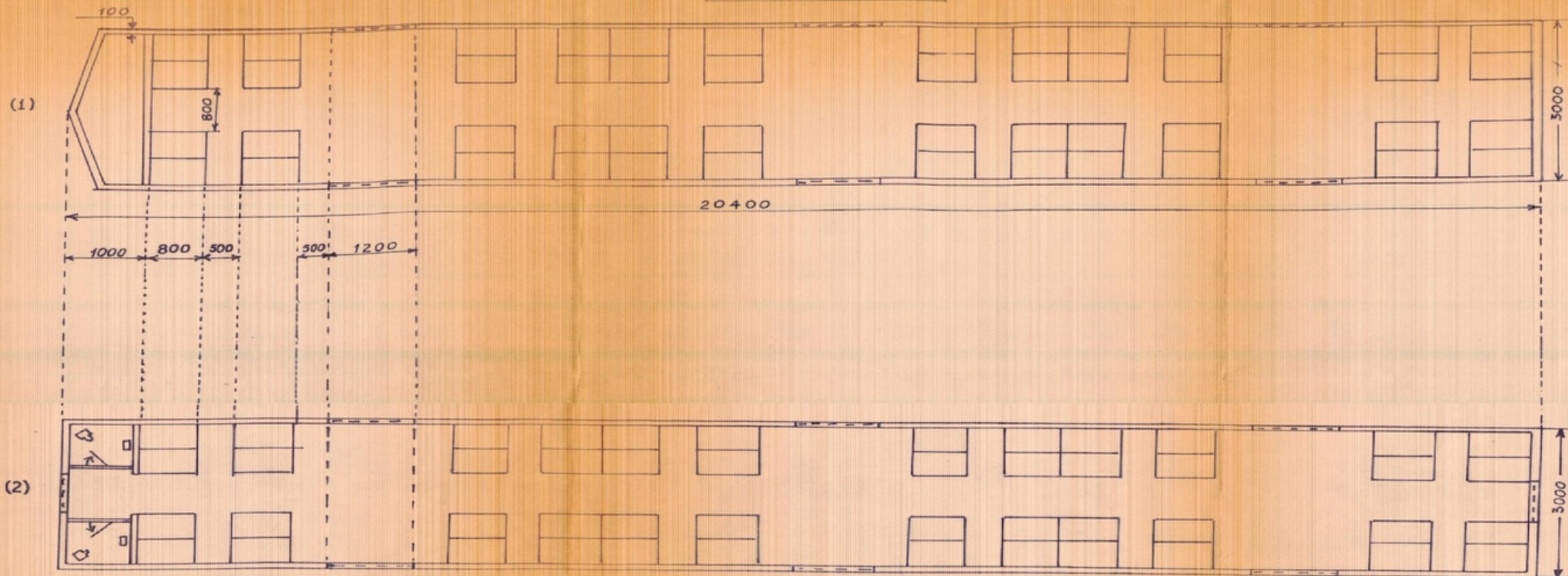
(2)



- (1) Automotrice avec 3 portes
- (2) Remorque intermédiaire avec 3 portes

Surface pour places assises : $0.4 \times 48 = 19.2 \text{ m}^2$
 Surface pour places debouts : $(19.8 \times 2.6) - (0.4 \times 48) = 32.2 \text{ m}^2$
 $\frac{4 \text{ P}}{\text{m}^2}$: $48 + 128 = 176$ personnes
 $\frac{5 \text{ P}}{\text{m}^2}$: $48 + 160 = 208$ personnes

VARIANTE 2



(1): Automotrice avec 3 portes

(2): Remorque intermediaire avec 3 portes

Surface pour places assises : $0.4 \times 48 = 19.2 \text{ m}^2$

Surface pour places debouts : $(19.2 \times 2.8) - 19.2 = 34.56 \text{ m}^2$

$\frac{4P}{\text{m}^2}$: $48 + 138 = 186$ personnes

$\frac{5P}{\text{m}^2}$: $48 + 132 = 220$ personnes

COMPARAISON
ENTRE LES DEUX RAMES AUTOMOTRICES PROPOSEES

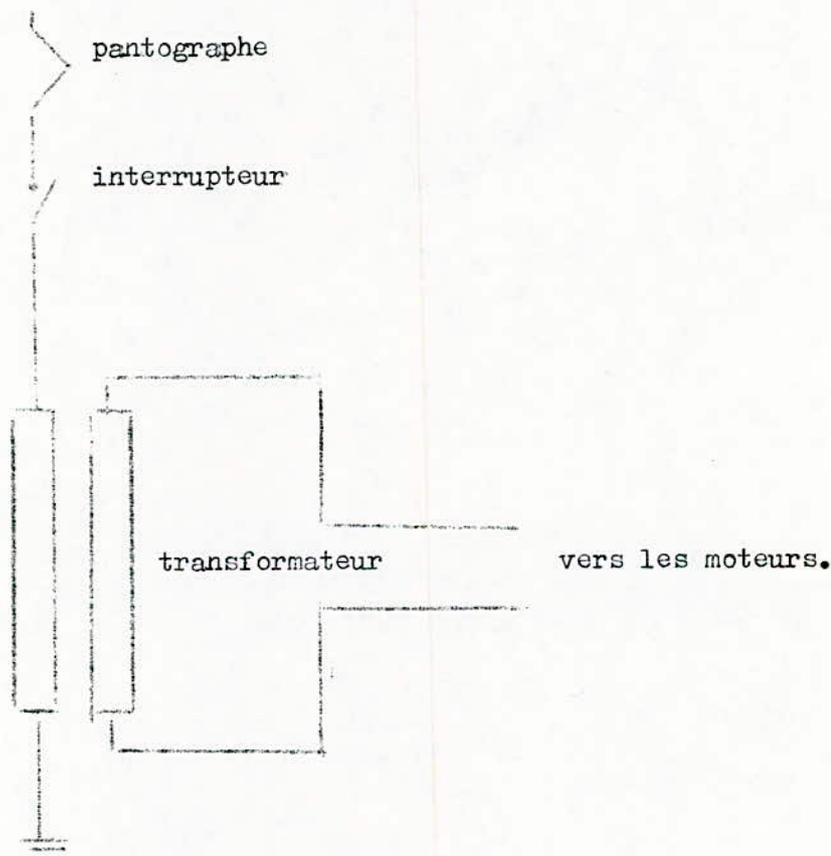
	AUTOMOTRICE	
	1 unité de 3 voitures	1 unité de 3 voitures
Longueur hors tampon	21 m	20,4 m
Places assises	48 x 3 = 144	48 x 3 = 144
Largeur	2,8 m	3 m
Places debout :		
- 4 p/m ²	128 x 3 = 384	138 x 3 = 414
- 5 p/m ²	160 x 3 = 480	173 x 3 = 519
Places totales :		
- pour 4 p/m ²	176 x 3 = 528	186 x 3 = 558
- pour 5 p/m ²	208 x 3 = 624	221 x 3 = 663
Rapport :		
<u>Places debout</u>		
Places assises		
- pour 4 p/m ²	1 pour : 2,66	1 pour : 2,87
- pour 5 p/m ²	1 pour : 3,35	1 pour : 3,58
Nombre de toilettes	2	2
Nombre de portes	9	9
Nombre de voyageurs par porte	69,3	73,6

Pour le captage du courant, l'on utilise soit des pantographes doubles, en version classique, ou des pantographes à un bras. Ce dernier, possède par rapport à la version classique les avantages suivants :

- moins de raccordements mécaniques,
- construction plus légère,
- moins d'inertie, donc meilleur contact avec la caténaire,
- moins de frottements dans les articulations.

Etant donné que pour les automotrices du trafic banlieue chaque réduction possible de poids rentre en ligne de compte, il est proposé d'utiliser le pantographe à un bras.

Le courant est amené du pantographe au transformateur par la ligne de toiture, d'un interrupteur principal, et des installations de mesure et de protection, et de là, retourné par les roues et les rails à la sous-station.



A de modernes locomotives ou automotrices à courant alternatif monophasé, sont installés des moteurs de traction à courant ondulatoire. Ils sont alimentés à l'aide d'un déphasage d'allumage par un courant ondulatoire comme suit :



Les transformateurs ne possèdent plus que peu de gradins, ils sont donc relativement légers et sont logés sous le châssis des automotrices.

Comme appareil de traction et de choc, il est proposé un accouplement automatique du type "SCHARFFENBERG" avec contacts pour les câbles de commande. Cela permet un attelage ou dételage rapide pour agrandir ou réduire les rames. En cas de panne du trafic électrique, cet attelage à tampon central peut être accouplé à l'aide d'une pièce médiane à un appareil de traction et de choc classique, ce qui permet d'effectuer des transports de bouettage et de manoeuvre avec des locomotives normales.

IV - PROGRAMME D'EXPLOITATION ET BESOIN EN VEHICULES

4.1. CAPACITE D'UN TRAIN

Le programme d'exploitation prévoit de séparer autant que possible le trafic banlieue du reste du trafic, parce que les trains de banlieue circulent selon un horaire rigide.

Nous avons étudié au paragraphe 3.1.3. deux variantes de voiture :

- Variante 1 : la rame a une capacité (5 p/m²) de 627 personnes ;
- Variante 2 : la rame a une capacité (5 p/m²) de 660 personnes.

D'après les directives de la S. N. T. F., la longueur d'un train ne saurait excéder les 220 m. Ceci est dicté par la longueur des pérons des gares, qui n'excède pas les 225 m. De plus, par expérience dans les villes dotées d'un trafic ferroviaire de banlieue, il a été constaté que les voitures de queue, quand la longueur dépassait les 225 m, étaient vides ou presque, à l'inverse de celles du milieu qui étaient bondées. Ceci s'explique par le fait que vu le peu de temps d'arrêt des rames, un voyageur était obligé de courir pour atteindre l'extrême porte avant ou arrière avant la fermeture automatique de celle-ci.

Donc et conformément aux vœux de la S. N. T. F., on assume une longueur n'excédant pas les 220 m.

4.1.1. Variante 1

La longueur d'une voiture étant de 21 m, celle d'une unité composée de 3 voitures sera de 61 m ; et comme la longueur d'un train ne saurait excéder les 220 m, on aura au maximum 3 unités de 3 voitures chacune. La capacité totale sera de

1 872 voyageurs. Vu que le nombre de voyageurs à transporter est de 28 800, il nous faut à l'heure de pointe :

$$\frac{28\ 800}{1\ 872} = 15,3 \text{ trains.}$$

donc environ 15 trains, à une cadence d'un train toutes les 4 minutes.

4.1.2. Variante 2

Pour cette seconde variante, la longueur d'une unité sera de 61,2 m. Un train aura donc une longueur maximum de 183,6 m et sa capacité sera de 1 980 voyageurs. Le nombre exige un nombre de trains par heure de pointe de 14 trains, donc une cadence de 4,2 minutes.

En comparant ces deux variantes, on a jugé plus intéressant et moins fastidieux d'accepter la première variante qui nous donne une cadence d'un train toutes les quatre minutes.

Il est intéressant de noter qu'une étude de la S. N. T. F. se basant sur les résultats du COMEDOR pour l'An 2000 prévoit une cadence d'un train toutes les cinq minutes.

Quant à nous et en nous basant sur les chiffres du COMEDOR, s'offrent à nous deux alternatives :

- ou transporter moins de voyageurs,
- ou bien installer une signalisation adéquate pour permettre ce trafic assez dense car chaque petit retard cause une désorganisation importante de tout le trafic.

La première alternative n'est pas à considérer vu qu'elle va à l'encontre du bon sens même.

Il y aurait moyen de diminuer la cadence des trains soit en augmentant la longueur des quais pour éliminer l'interdiction de dépasser les 220 m, mais là intervient le facteur social (paragraphe 4.1.) ; soit en augmentant le nombre de voies,

mais ici on est limité par le site (il est impossible de mettre d'autres voies).

En conclusion, bien que le chiffre de 28 800 voyageurs par heure de point soit une limite un peu excessive à notre avis, nous l'assumons sans aucune réserve. En cas de besoin, on peut avoir des trains surchargés.

4.2. PROGRAMME D'EXPLOITATION ET GRAPHIQUE DE MARCHE

On part du principe que les trains circuleront les jours ouvrables de 4 heures 30 minutes jusqu'à 0 heure 30 minutes, c'est-à-dire 20 heures par jour. Durant ce temps, il existe des périodes de :

- trafic de point de 7 h à 9 h et de 17 h à 19 h (4 heures par jour) ;
- trafic moyen de 5 h 30 min à 7 h, de 9 h à 17 h et de 19 h à 21 h (11 heures 30 min par jour) ;
- heures creuses : de 4 h 30 min à 5 h 30 min et de 21 h à 0 h 30 min (4 h 30 min par jour).

D'après les constatations faites au paragraphe précédent, il ressort que le flux de transport en l'An 2000 exige une fréquentation des lignes qui atteint 15 trains par heure de pointe. Pour cela, il faut :

- un nombre suffisant de voies (voie double) et un équipement technique à toute épreuve en ce qui concerne la sécurité, la vitesse et la fiabilité ;
- la circulation doit être l'objet de concentration et être surveillée par un contrôle constant et efficace ou par une commande centralisée. Cela peut avoir lieu par la création de postes d'exploitation (dispatching, régulation centralisée des trains...) et surtout par une formation spécifique du personnel des gares et des régulations dont il s'agit.

Ce système de la régulation et de la surveillance centralisée exige en outre un système de communication d'un fonctionnement remarquable entre les divers services en cause. La première condition en est un réseau de télécommunications suffisamment émaillé.

Pour notre étude nous assumons que les deux conditions énoncées précédemment sont remplies.

En nous reportant au graphe n° 3. on remarque la concentration des voyageurs sur une partie du tronçon qui est TAFOURAH - DAR EL BEIDA. Alors que le trafic sur le tronçon restant est relativement faible. Cette différence d'affluence nous a décidé de faire circuler des trains directs et semi-directs. Ceci a, outre l'avantage de réduire la durée de voyage sur celles des sections de lignes où circulent des trains directs, celui de réduire le nombre du besoin en rames.

Compte tenu du volume de transport du trafic aux heures de pointe, nous proposons le nombre de trains suivant pour la desserte des différentes relations.

RELATIONS	Distance km	Nombre de trains par sens de marche et		
		de pointe	normale	creuse
TAFOURAH vers DAR EL BEIDA	19,73	15	8	4
TAFOURAH vers THENIA	34	8	4	2

4.2.1. Vitesse commerciale

Sous les directives de Monsieur le Professeur J. PODOSKI, on a assumé sans autre considération aucune la courbe empirique donnant la vitesse moyenne pour rames automotrices de puissance unitaire 2 400 kW et ayant une accélération au démarrage de 0,5 m/s jusqu'à la vitesse de 55 km/h (Voir graphe n° 4).

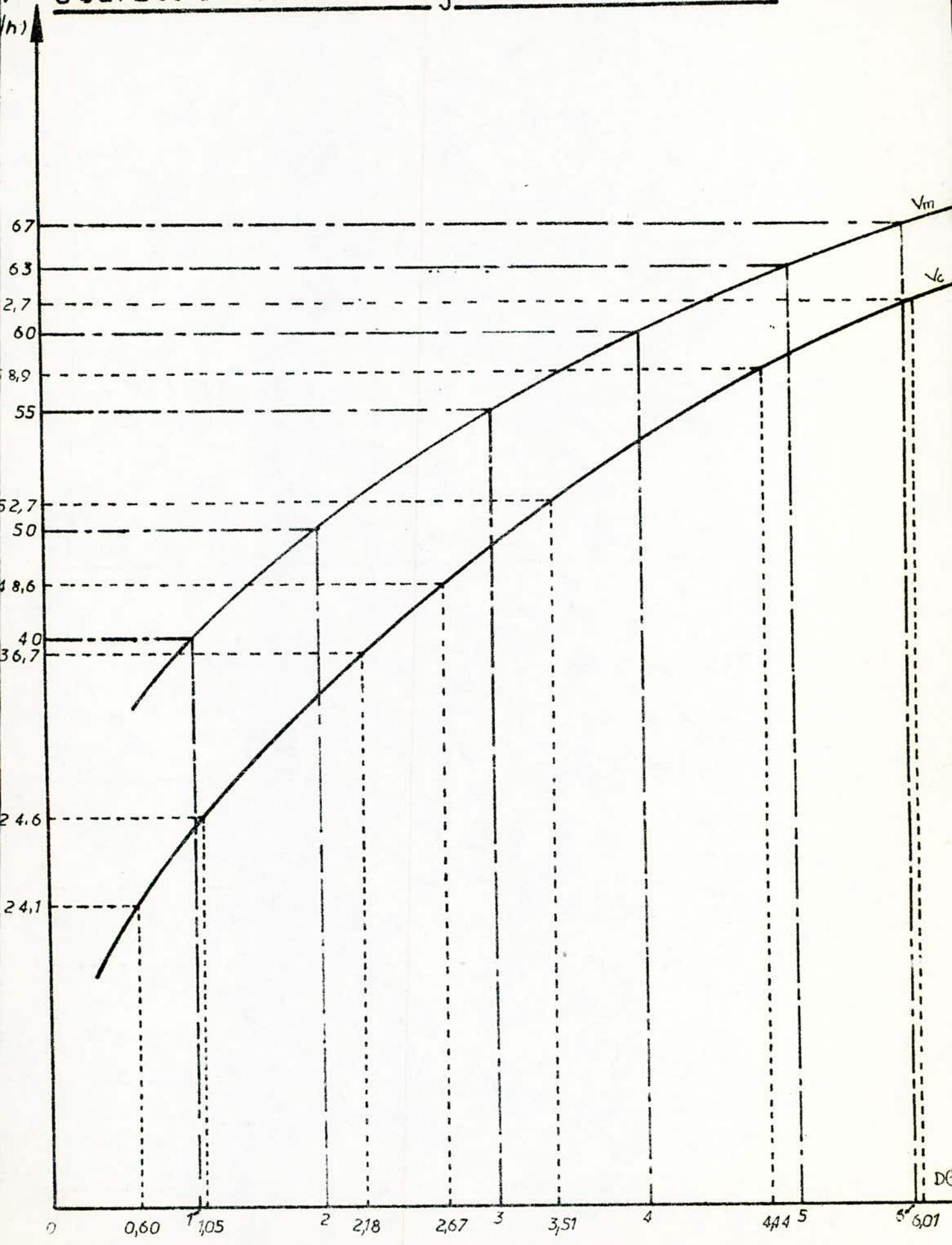
La vitesse commerciale est la vitesse moyenne à laquelle on ajoute les temps d'arrêts.

Les temps d'arrêts ont été considérés ainsi :

- * 60 s d'arrêt pour une gare de correspondance,
- * 30 s d'arrêt pour une gare à trafic important,
- * 20 s d'arrêt pour une gare à trafic réduit.

Ayant la courbe empirique vitesse moyenne en fonction de la distance (graphe n° 4), on calcule le temps de parcours de la manière suivante : connaissant la distance entre 2 arrêts, on lit sur la courbe (graphe n° 4), on trouve la vitesse moyenne, en nous référant au graphe n° 3 , on a le temps d'arrêt.

Courbes des Vitesses Moyenne et commerciale.



- fig 4 -

La distance parcourue divisée par la somme des temps de parcours et d'arrêt nous donne la vitesse commerciale dont voici le tableau.

PARCOURS	Distance (km)	Temps de parcours (min)	Temps d'arrêt (s)	Temps total (min)	Vitesse commerciale (km/h)
Tafourah-Premier Mai	2,43	2,78	20	3,11	4,68
Premier Mai-Hamma	0,63	1,20	30	1,70	22,2
Hamma-Jardin d'essai	1,09	1,60	30	2,10	31,1
Jardin d'essai-Hussein-Dey	1,48	1,97	60	2,97	29,8
Hussein-Dey-Caroubier	0,60	1,16	20	1,49	24,1
Caroubier-Diar el Djemaa	3,29	3,46	20	3,79	52,0
Diar el Djemaa-El Harrach	0,80	1,30	60	2,30	20,8
El Harrach-El Harrach Ind.	2,62	2,93	20	3,26	48,2
El Harrach Ind.-O. Esmar	2,18	2,56	60	3,56	36,7
O. Esmar-USTA	1,29	1,80	30	2,30	33,6
USTA-Gare centrale	1,05	1,56	60	2,56	24,6
Gare centrale-Dar el Beida	2,27	2,62	30	3,12	43,6
Dar el Beida-Rouiba	6,01	5,42	20	5,75	62,7
Rouiba-Rouiba Ind.	1,89	2,33	20	2,66	42,6
Rouiba Ind. - Rouiba SONACOME	1,38	1,90	20	2,23	37,1
Rouiba SONACOME-Rouiba Ind.	0,98	1,47	20	1,80	32,6
Rouiba Ind.-Reghaia	1,05	1,56	20	1,89	33,3
Reghaia-Bessabine	2,47	2,82	20	3,15	47,0
Bessabine-Boudouaou	4,94	4,70	20	5,03	58,9
Boudouaou-Corso	2,67	2,82	20	3,29	48,6
Corso-Boumerdes	3,88	3,91	20	4,24	54,9
Boumerdes-Tidjelabine	3,51	3,66	20	3,99	52,7
Tidjelabine-Thénia	4,81	4,61	20	4,94	58,4

Grâce à ce tableau, on trace le graphe de la vitesse commerciale en fonction de la distance (Voir graphe n° 4).

Remarque : En comparant ces deux graphiques, on remarque que celui de la vitesse commerciale a une pente relativement faible.

Enfin et à l'aide du temps total de parcours, on trace le graphique de marche (Voir graphe n° 5).

Ce graphique a été établi ainsi :

- en abscisse on a mis les temps,
- en ordonnée on a mis les distances.

Afin de ne pas compliquer ce graphe et comme la demande d'énergie s'établit en fonction des moments de pointe, on s'est astreint à n'en faire qu'une partie, celle de l'heure de pointe du matin.

4.3. BESOIN EN RAMES

D'après le graphique de marche, on trouve 28 trains en service à l'heure de pointe. Donc le besoin en matériel roulant sera :
 $28 \times 3 = 84$ rames automotrices.

On assure une réserve en cas de panne, détérioration, réparation ou révision de 15 %, donc :

$$\frac{84 \times 15}{100} = 12,6 \# 13 \text{ rames automotrices.}$$

Le besoin total en rames sera de

$$84 + 13 = 97 \text{ rames.}$$

V - DETERMINATION DES BESOINS EN ENERGIE

5.1. CONCEPTION DES ENGINES MOTEURS

Avant de pouvoir calculer la puissance des moteurs de traction pour un système ferroviaire, il est nécessaire de fixer un mode de transmission pour les engins moteurs, car le facteur de puissance (en alternatif) a une influence certaine sur les besoins en énergie.

Malgré les possibilités de freinage électrodynamique, rhéostatique ou à récupération, il ne nous a pas paru opportun de considérer cela, vu les grands problèmes rencontrés par la récupération. En effet, celle-ci lors du freinage est astreinte à certaines conditions qui ne sont pas toujours remplies :

- la tension au bord du moteur doit être supérieure à celle de la ligne ;
- il faut qu'il y ait un train en ligne qui consommerait le courant produit.

De plus, le freinage en récupération ne concerne que la voiture motrice et dans ces conditions la décélération serait insuffisante. Enfin, ce genre de freinage cesse d'être opérationnel, au dessous d'une certaine vitesse, et il faut avoir recours au freinage à air comprimé.

Donc pour les besoins en énergie, on ne considérera que les automotrices et leur capacité en voyageurs.

Les automotrices servant de base à la détermination des besoins en énergie ont les caractéristiques suivantes :

- Disposition des essieux : 2 bogies à 2 essieux.
- Alimentation électrique :
 - * 3 kV en continu
 - * 25 kV, 50 Hz monophasé.
- Moteurs de traction :
 - * 4 moteurs série de puissance $P_h = 200$ kW, *courant continu*
 - * 4 moteurs courant ondulé de puissance $P_h = 200$ kW
- Facteur de puissance : $\cos \alpha = 0,9$
- Frein : à air comprimé
- Poids : rame de 3 voitures (vides) : 122 t.

En ce qui concerne la charge d'une ^{rame} automotrice, on considère que l'espace ne sera occupé qu'aux 2/3 et ceci vu la dispersion du nombre de voyageurs sur la ligne.

On aura donc pour une rame :

$$208 \times 3 \times \frac{3}{4} = 468 \text{ voyageurs,}$$

en assumant 16 voyageurs # 1 t, on aura le poids total d'une rame :

$$122 + \frac{468}{16} = 151 \text{ t.}$$

Le poids total d'un train composé de 3 rames :

$$150 \times 3 = 455 \text{ t.}$$

5.2. CONSOMMATION D'UN TRAIN AU DEMARRAGE

Une motrice équipée de 4 moteurs a une puissance horaire de
 $4 \times 200 = 800 \text{ kW}$.

Un train composé de 3 rames a une puissance de
 $P = 3 \times 800 = 2\,400 \text{ kW}$.

Au démarrage la puissance demandée peut atteindre une valeur égale à 2 P.

En ce qui nous concerne, on accepte une surcharge inférieure à 2 P. En effet, en trafic banlieue, une surcharge au démarrage égale à 1,5 P est jugée acceptable. Ceci est dû au refroidissement des moteurs, aux petites distances de parcours et au profil de la ligne (qui n'accuse pas de rampes notables). Donc un train qui démarre fait appel à une puissance de :

$$2\,400 \times 1,5 = 3\,600 \text{ kW}.$$

Remarque : Le courant de démarrage sera de l'ordre de :

$$P = UI \cos \varphi \rightarrow I = \frac{P}{U \cos \varphi} = \frac{3\,600 \cdot 10^3}{25 \cdot 10^3 \cdot 0,9} = 160 \text{ A}.$$

5.3. CONSOMMATION D'ENERGIE

La consommation en énergie est directement proportionnelle à l'effort de traction. Ce dernier est utilisé essentiellement pour :

- * vaincre les résistances de roulement,
- * accélérer.

Le point d'accélération nulle est important, car c'est la vitesse maximum que peut atteindre le train. Sur les pentes par exemple la résistance de roulement augmente d'un kg/t et par 1 o/oo.

Pour notre part et sans vouloir entrer en détails, on assume une consommation moyenne. Pour cela on s'est référé à la formule citée par le Professeur J. PODOSKI dans son ouvrage intitulé : "ZASADY TRAKCJI ELEKTRYCZNES" page 393, pour la consommation unitaire (explication détaillée en ANNEXE 1).

Toute approximation faite, on aura :

la consommation unitaire sera de :

* courant continu

$$q_s = 3,2 \left[2 + 0,04 V_{sr} + \frac{14,22}{L} + \frac{5,96}{L} \right]$$

* courant alternatif

$$q_s = 3,2 \left[2 + 0,04 V_{sr} + \frac{14,22}{L} \right]$$

L = longueur du parcours

V_{sr} = vitesse moyenne sur ce parcours.

En assumant de plus que compte tenu des pertes dans les sous-stations et dans la caténaire, on aura :

* pertes en continu

5 % dans les circuits auxiliaires,

8 % dans la caténaire.

* pertes en alternatif

on estimera à 5 % les pertes dans la caténaire et dans la sous-station.

Assumant tout cela, on aura les deux tableaux suivants :

* en continu

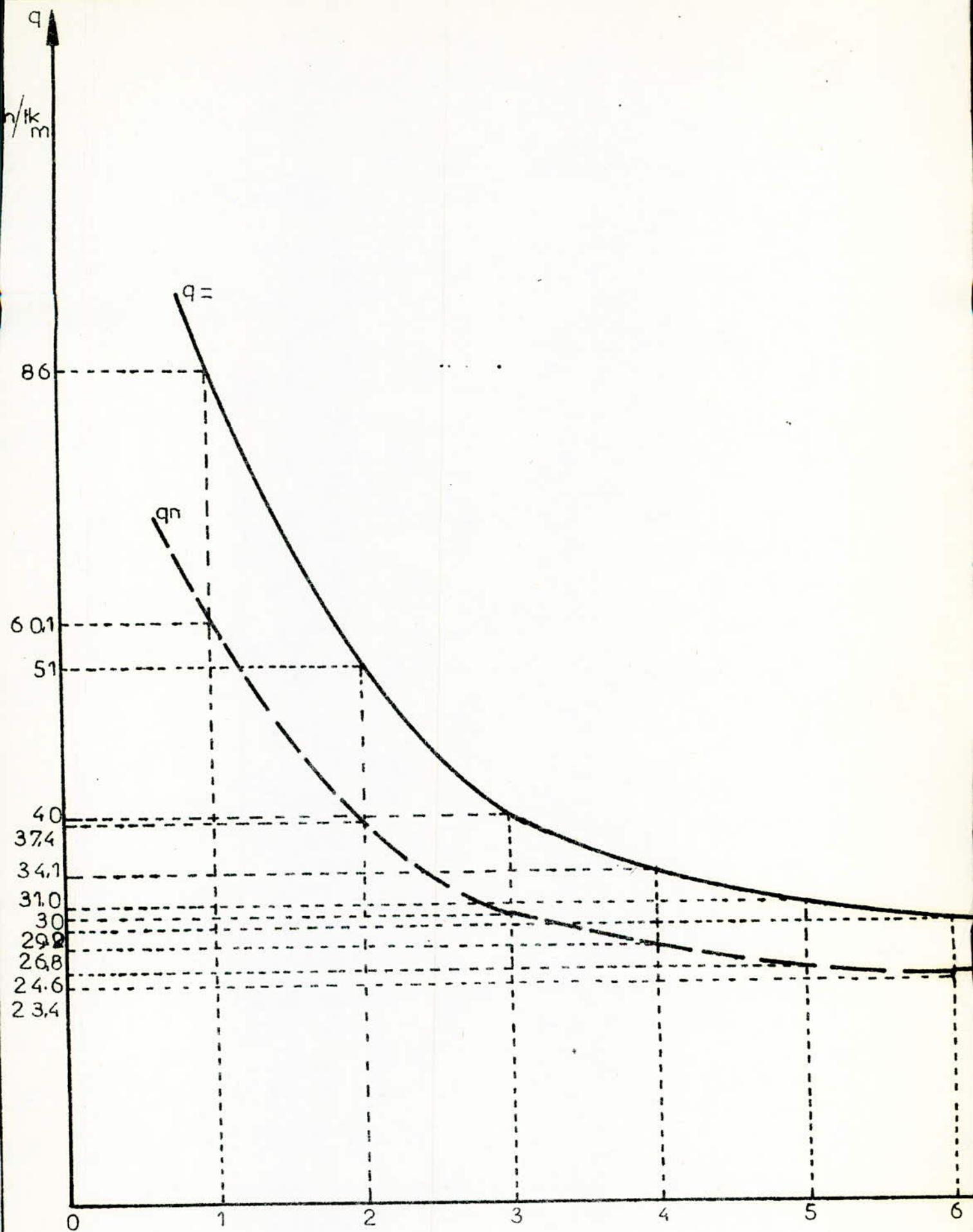
L (km)	V_{sr}	$0,04 V_{sr}$	$\frac{20,18}{L}$	q_s	$q = 1,13 q_s$
1	40	1,6	20,18	76,1	86,0
2	50	2,0	10,09	45,1	51,0
3	55	2,2	6,73	35,0	40,0
4	60	2,4	5,05	30,2	34,1
5	63	2,5	4,04	27,3	31,0
6	67	2,7	3,36	25,8	29,2

* en alternatif

L (km)	V_{sr}	$0,04 V_{sr}$	$\frac{14,22}{L}$	q'_s	$q' = 1,05q'_s$
1	40	1,6	14,22	57,2	60,1
2	50	2,0	7,11	35,6	37,4
3	55	2,2	4,74	28,6	30,0
4	60	2,4	3,55	25,5	26,8
5	63	2,5	2,84	23,8	25
6	67	2,7	2,37	22,9	24,0

Grâce à ces deux tableaux, on pourra tracer les deux courbes des consommations moyennes (Voir graphe n° 6).

Remarque : Ce travail nous servira dans les deux chapitres suivants (Electrification en courant continu et en courant alternatif).



- fig 6 -

VI - ELECTRIFICATION EN COURANT CONTINU

6.1. CALCUL DES CHUTES DE TENSION DANS LA LIGNE DE CONTACT

Entre la ou les sous-stations qui alimentent la locomotive et le pantographe de celle-ci existe une chute de tension qui dépend de l'intensité absorbée et de la résistance de la portion de la ligne intéressée. Une locomotive qui se déplace aura donc à son pantographe une tension constamment variable.

Le problème de l'équipement de la ligne consistera à déterminer les distances entre sous-stations et la section de la ligne de contact de façon que la tension du pantographe satisfasse aux deux conditions suivantes :

- a) que la tension moyenne au long du parcours reste suffisamment voisine de la tension nominale pour permettre aux trains d'utiliser normalement leur capacité de traction et assurer une marche régulière des trains ;
- b) qu'en aucun point du parcours la tension ne tombe à une valeur inférieure à un certain minimum pour lequel l'équipement du train a été établi (c'est-à-dire fonctionnement de l'appareillage et des machines auxiliaires).

La chute de tension admissible dans notre cas est
(25 ÷ 30) % U (U étant la tension de sortie des sous-stations
U = 3 300 V).

$$\Delta U = \left(\frac{3\,300 \times 25}{100} \div \frac{3\,300 \times 30}{100} \right) V$$

$$\Delta U = (825 \div 990) V$$

Il existe deux variables :

- a) l'intervalle entre sous-stations,
- b) la section des caténaires.

Donc on pourra résoudre le problème soit avec une grosse section caténaire et des sous-stations plus espacées, soit avec moins de feeder (c'est-à-dire des sections plus petites) et davantage de sous-stations.

Mais dans certains cas ce seront des questions particulières qui décideront (intérêts ou interdictions de certains emplacements pour les sous-stations). Le plus souvent on choisira dans l'éventail des combinaisons les plus économiques.

Calcul de la résistance kilométrique du circuit de traction en C.C.

soit R cette résistance kilométrique (caténaire + voies de roulement compte tenu des mises en parallèle entre les voies).

R dépend de la section de la caténaire et du type de rails.

La résistance de la caténaire par km proprement dite est pratiquement donnée par la valeur $\frac{18,8}{S}$ à 40° C (S étant la section caténaire en mm²).

Pour des raisons mécaniques : on assume la section à 2 x 120 mm² de cuivre + (80 ÷ 100) mm² de bronze, soit une section totale de 2 x 120 + 80 = 320 mm².

Quant à la résistance du circuit de retour elle dépend non seulement du type de rail mais aussi de la résistance supplémentaire introduite par les éclissages entre barres successives, elle dépend aussi de la résistance d'isolement de voie par rapport au sol.

Pratiquement avec assez d'approximation, on peut utiliser la formule empirique suivante $\frac{0,9}{P}$ (P étant le poids en kg par mètre de rail).

Pour une caténaire de 360 mm^2 avec fil de contact mi-usé c'est à dire 320 mm^2 (le fil de contact réduit de 15 %, le maximum d'usure toléré étant 30 %) et voie en rails standard de 50 kg au mètre, cela donne :

$$R = \frac{18,8}{320} + \frac{0,9}{50} \# 0,059 + 0,018 = 0,077 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$R = 0,077 \text{ } \Omega/\text{km}$$

Calcul des chutes de tension

On doit calculer les chutes de tension pour le cas le plus défavorable. Pour cela, nous examinons la situation théorique suivante : démarrage d'un train sur une seule voie au bout d'une ligne.

Pour le calcul des chutes de tension, on se réfère au tableau suivant qui résume le calcul des chutes de tension dans deux cas extrêmes :

- U tension de sortie des sous-stations est indépendante de la charge et la même pour deux sous-stations consécutives ;
- calcul des courants de démarrage.

On sait que la puissance demandée au démarrage par un train est de 3 600 kW

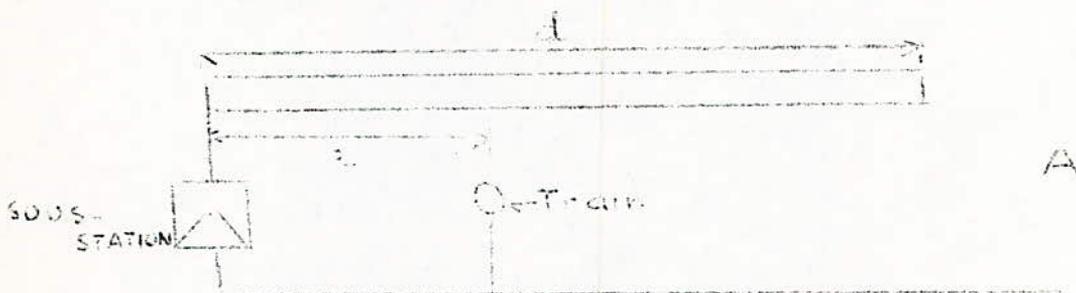
$$\text{où } I_{\text{dem}} = \frac{\text{Puissance démarrage}}{U}$$

$$\text{donc } I_{\text{dem}} = \frac{3\,600\,000}{3\,000} = 1\,200 \text{ A}$$

$$I_{\text{dem}} = 1\,200 \text{ A}$$

Tableau pour calcul des chutes de tension

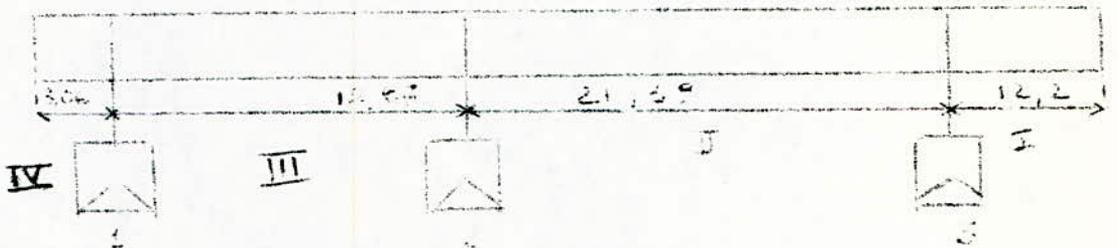
Type d'alimentation	$\Delta U (x)$	$\Delta U \text{ max.}$	Abscisse de $\Delta U \text{ max.}$	$\Delta U \text{ moy.}$
A Alimentation en flèche Voie double avec mise en parallèle à l'ex- trémité	$RxI(1 - \frac{x}{2d})$	$R \frac{dI}{2}$	d	$R \frac{dI}{3} = \frac{2}{3} \Delta U_{\text{max.}}$
B Alimentation bilatérale (voie unique ou double) sans mise en parallèle	$RxI(1 - \frac{x}{d})$	$R \frac{dI}{4}$	$\frac{d}{2}$	$R \frac{dI}{6} = \frac{2}{3} \Delta U \text{ max.}$
C Alimentation bilaté- rale Voie double avec mise en parallèle au milieu	$RxI(1 - \frac{3}{2} \frac{x}{d})$	$R \frac{dI}{6}$	$\frac{d}{3}$	$R \frac{dI}{8} = \frac{3}{4} \Delta U \text{ max.}$





Emplacement des sous-stations

1) Cas de 3 sous-stations



Choix des emplacements des sous-stations

- La sous-station 1 est placée près d'un poste de haute tension SONELGAZ, de même elle est placée dans une région de grande charge et aussi presque au bout de la ligne ferroviaire car il y a possibilité d'extension de celle-ci.
- La sous-station 2 est placée à Dar El Beida là où il y a beaucoup de manoeuvres.
- La sous-station 3 est placée près du poste haute tension de Rouiba Industrielle de même elle est placée presque au bout de la ligne ferroviaire car il y a aussi possibilité d'extension de celle-ci.

Calcul de la chute de tension

Région I

Ici on a assumé un cas où deux trains démarrent simultanément sur deux voies mises en parallèle, donc pour le calcul c'est l'équivalent d'un train sur une voie :

$$\Delta U \text{ max.} = \frac{R \text{ d I}}{2}$$

$$\Delta U \text{ max} = \frac{0,077 \times 12,2 \times 1 \text{ 200}}{2} = 563,6 \text{ V} < 825 \text{ V}$$

donc c'est une chute de tension acceptable.

Région II

Cas d'un train unique sur une seule voie au milieu des sous-stations.

$$\Delta U \text{ max} = \frac{0,077 \times 21,39 \times 1 \text{ 200}}{4}$$

$$\Delta U \text{ max} = 494 \text{ V acceptable}$$

On voit aisément que la chute de tension est encore acceptable dans les régions III et IV vu leurs tronçons de ligne relativement courts.

Mais la solution avec trois sous-stations a pour inconvénients :

- elle exige des groupes de "réserves passives" si on veut une alimentation permanente,
- en cas d'entretien ou de panne d'une sous-station (très rare).

Le double intervalle entre sous-stations risque d'avoir des chutes de tension inadmissibles.

Pour cela, l'implantation de nouvelles sous-stations dans l'intervalle le plus grand procure évidemment une amélioration notable de la qualité d'alimentation.

Donc, on passe de trois à quatre sous-stations.

Dans ces conditions, l'intervalle entre sous-stations est réduit et en cas d'effacement de l'une d'elles (très rare) ou en cas d'entretien de l'une d'elles, le double intervalle correspondant est alimenté dans des conditions encore acceptables (on n'a pas de risque de grandes chutes de tension). C'est la solution à sous-stations réparties.

Dans cette solution, il y a en général moins de groupes de traction.

On assumera donc désormais quatre sous-stations. L'étude se fera dans cette perspective.

Cas de 4 sous-stations



6.2. CALCUL DES PUISSANCES DES SOUS-STATIONS

En se basant sur la courbe de consommation moyenne pour calculer la consommation moyenne dans chaque tronçon et la formule :

$$Q = \frac{N \cdot P \cdot q}{1000} \quad (\text{kWh})$$

Q = consommation totale dans chaque tronçon

P = poids du train plus 2/3 de la charge P = 455 tonnes

N = nombre de trains-km dans chaque tronçon.

La puissance P à l'heure de pointe est donnée par

$$P = \frac{Q}{1 \text{ heure de pointe}} \quad (\text{kW})$$

On aura donc à l'heure de pointe :

Tronçon		I	II	III	IV	V
Nombre de trains-km	N	88,46	491,56	164,2	201,54	116
Consommation moyenne	q	61,6	59,2	48	36,58	34
Consommation dans chaque tronçon	Q	2479,4	13240,7	3586	3354,4	1794,5
Puissance dans chaque tronçon	P(kW)	2479,4	13240,7	3586	3354,4	1794,5

Calcul des puissances des sous-stations

Sous-stations	1	2	3	4
Puissance (kW)	$P_1 = P_I + \frac{P_{II}}{2}$	$P_2 = \frac{P_{II}}{2} + \frac{P_{III}}{2}$	$P_3 = \frac{P_{III}}{2} + \frac{P_{IV}}{2}$	$P_4 = \frac{P_{IV}}{2} + P_V$
P kW	$P_1 = 9099,75$	$P_2 = 8413,35$	$P_3 = 3470,2$	$P_4 = 3471,7$

Nombre de groupes :

- Sous-station (1) : 2 groupes de 5 000 kW
 Sous-station (2) : 2 groupes de 5 000 kW
 Sous-station (3) : 1 groupe de 5 000 kW (plus 1 groupe de réserve de 5 000 kW)
 Sous-station (4) : 1 groupe de 5 000 kW.

- Le groupe de réserve de la sous-station (3) a pour rôle de maintenir (2) en cas d'entretien ou de panne de celle-ci.

- Si la sous-station (1) tombe en panne (par exemple incendie) (1) est alors maintenue par (2), on aura :

$$\Delta U \text{ max} = \frac{(16,67 + 3,06) \times 0,077 \times 1\ 200}{2}$$

$$\Delta U \text{ max} = 911,52 \text{ V} < 990 \text{ V} \text{ donc acceptable}$$

- Si (2) tombe en panne ou en entretien. Elle sera maintenu par les sous-stations (1) et (3)

$$\Delta U \text{ max} = \frac{16,67 + 11,31) \times 0,077 \times 1\ 200}{4}$$

$$\Delta U \text{ max} = 646,34 \text{ V} \text{ acceptable}$$

- De même si (3) tombe en panne, elle sera maintenue par les sous-stations (2) et (4).

- Si la sous-station (4) tombe en panne (car elle contient un groupe seulement)

$$\Delta U \text{ max} = \frac{(13,96 + 8,32) \times 0,077 \times 1\ 200}{2} = 1\ 029,34 \text{ V}$$

$$\Delta U \text{ max} = 1\ 029,34 \text{ V} \text{ dépasse les } 30 \% \text{ de } U.$$

Donc pour remédier à cela, on ajoute un feeder parallèle à la ligne caténaire pour augmenter la section existante entre Reghaia et Boumerdes.

6.3. SOUS-STATION EN COURANT CONTINU

La fonction des sous-stations est de transformer l'énergie H.T. sous forme admissible par les engins moteurs.

Une sous-station comprend les parties suivantes :

- le poste H.T. où elle reçoit le courant,
- les groupes de traction (conversion)
- le poste de distribution du courant aux lignes caténares,
- les organes accessoires appelés services auxiliaires.

6.3.1. Le poste à H.T.

Le réseau de transport SONELGAZ alimente les sous-stations S.N.T.F. En règle générale, la limite de propriété est l'ancrage des lignes sur le portique de la sous-station.

S.N.T.F. et SONELGAZ étudiant ensemble le problème, examinent les possibilités du réseau de transport dans la zone à électrifier et tenant compte du développement économique de la région intéressée choisissent la solution la plus intéressante sur le plan général. On aboutit alors soit à une simple dérivation d'une ligne existante pour desservir telle sous-station soit à un renforcement du réseau général soit à la création d'une ligne propre à la S. N. T. F.

Ce sont donc des solutions très diverses adaptées à chaque cas et donnant un ensemble rationnel, économique conduisant à des installations mieux utilisées.

Le poste H.T. comprend essentiellement les arrivées de ligne et la distribution à un ou plusieurs groupes de conversion ainsi qu'aux services auxiliaires.

Dans les récentes électrifications, la disposition généralement adoptée comprend 2 arrivées simples à H.T. sans disjoncteur, assurant l'alimentation d'un jeu de barres sur lequel sont branchés le groupe de conversion et le transformateur des services auxiliaires, la figure n° 7 donne le schéma.

Le jeu de barres et les connexions aux appareils sont constituées dans la plupart des cas, par des tubes d'alliage d'aluminium posés sur isolateurs et charpentes légères.

Toutes les charpentes sont maintenant galvanisées.

La figure n° 8 donne le schéma d'alimentation H.T. des sous-stations.

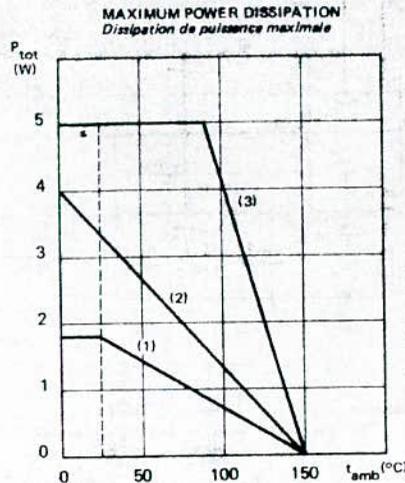
Figure N° 33
Caractéristiques
techniques du TBA 800

ELECTRICAL CHARACTERISTICS
CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES

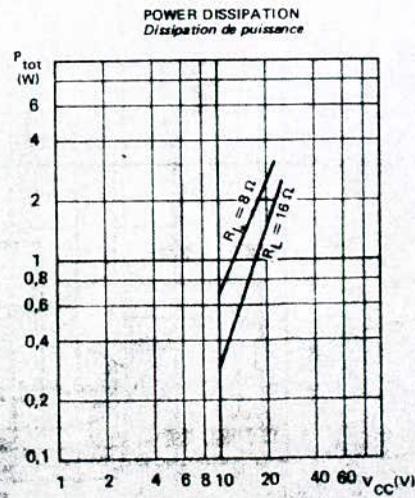
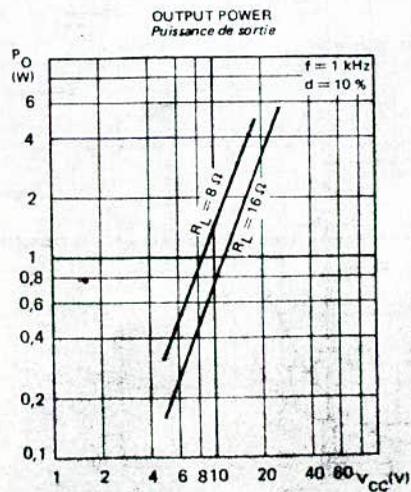
$t_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$ (Note 1)

	Test conditions Conditions de mesure		Min. Typ. Max.	
Input voltage Tension d'entrée		$V_{IM(eff)}$	220	mV
Sensitivity Sensibilité	$V_{CC} = 24\text{ V}$ $R_L = 16\ \Omega$ $P_O = 5\text{ W}$ $R_f = 56\ \Omega$ $f = 1\text{ kHz}$	S	80	mV
Input resistance (pin 8) Impédance d'entrée (broche 8)		Z_I	5	M Ω
Frequency response (-3 dB) Bande passante (-3 dB)	$V_{CC} = 24\text{ V}$ $C_3 = 330\text{ pF}$ $R_L = 16\ \Omega$ $R_f = 56\ \Omega$	B	40 - 20 000	Hz
Distortion Distorsion	$V_{CC} = 24\text{ V}$ $P_O = 50\text{ mW} + 2,5\text{ W}$ $R_L = 16\ \Omega$ $R_f = 56\ \Omega$ $f = 1\text{ kHz}$	d	0,5	%
Voltage gain (open loop) Gain de tension en boucle ouverte	$V_{CC} = 24\text{ V}$ $R_L = 16\ \Omega$ $f = 1\text{ kHz}$	A_V	80	dB
Voltage gain (closed loop) Gain de tension en boucle fermée	$V_{CC} = 24\text{ V}$ $R_L = 16\ \Omega$ $R_f = 56\ \Omega$ $f = 1\text{ kHz}$	A_V	39 42 45	dB
Input noise voltage Tension de bruit à l'entrée	$V_{CC} = 24\text{ V}$ $R_G = 0$ B (-3 dB) = 40 - 20 000 Hz	V_{nl}	5	μV
Input noise current Courant de bruit à l'entrée	$V_{CC} = 24\text{ V}$ B (-3 dB) = 40 - 20 000 Hz	I_n	0,2	nA
Efficiency Rendement	$V_{CC} = 24\text{ V}$ $P_O = 4\text{ W}$ $R_L = 16\ \Omega$ $f = 1\text{ kHz}$	η	70	

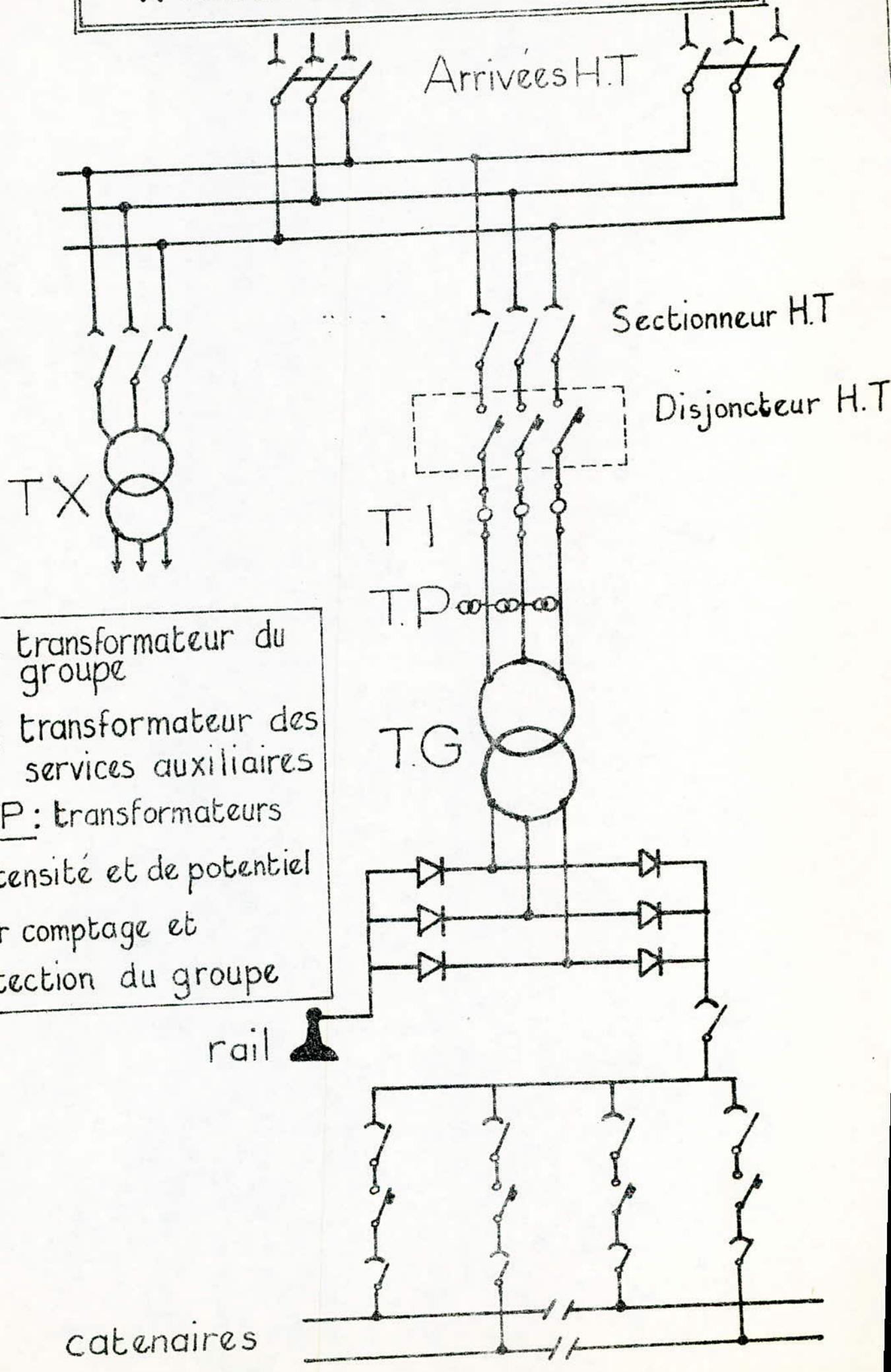
GENERAL CHARACTERISTICS
CARACTERISTIQUES GENERALES



- (1) : Without heatsink
Sans radiateur
- (2) : With a 25°C/W heatsink
Avec radiateur de 25°C/W
- (3) : With infinite heatsink
Avec radiateur infini



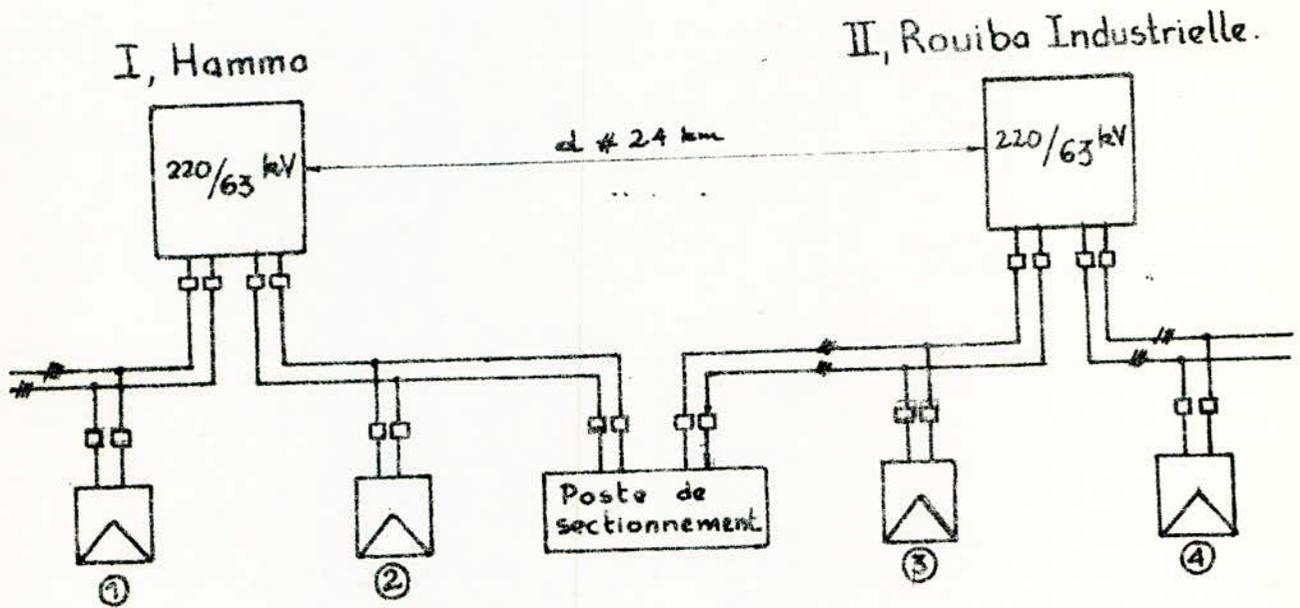
**SCHEMA SIMPLIFIE D'UNE SOUS STATION
A COURANT CONTINU 3000 V**



T.G.: transformateur du groupe
T.X.: transformateur des services auxiliaires
T.I, T.P.: transformateurs d'intensité et de potentiel pour comptage et protection du groupe

Fig - 7 -

Alimentation H.T. des Sous-Station.



 = Sous-Station.

I, II : Postes de transformation Sonelgaz

Ce schéma est celui qui présente le plus de sécurité. Chaque sous-station est raccordée en permanence aux deux lignes H.T., lesquelles se trouvent mises en parallèle à chaque sous-station par la barre H.T. de celle-ci et les deux disjoncteurs de raccordement. En cas de défaut sur une ligne, il y a déséquilibre entre les courants qui traversent ces disjoncteurs. Celui raccordé à la ligne saine et dans lequel, le courant passe dans le sens ligne vers sous-station se bloque, tandis que l'autre se déclenche. La sous-station reste constamment alimentée.

6.3.2. Les transformateurs

La partie spécialisée de la sous-station commence au transformateur qu'il soit destiné à former un groupe redresseur ou qu'il soit monophasé directement connecté à la caténaire, il est soumis au régime fort de la traction électrique du fait des surcharges répétitives et des courts-circuits en ligne de traction.

Pour la robustesse on demande un calage des enroulements très soigné.

Les transformateurs se présentent comme ceux d'un réseau de distribution à ventilation naturelle. La ventilation forcée est moins utilisée possible pour éviter les organes tournants. Elle n'est en générale pas nécessaire du fait du régime de pointe de la traction : car la constante de temps thermique d'un transformateur dans l'huile est de plusieurs heures donc beaucoup plus grande que la durée des pointes de trafic.

Pour la détermination du transformateur un autre facteur entre en jeu : ce sont les pertes.

Le régime des charges de traction est assez spécial, pour cela il faut donc rechercher le rapport optimal des pertes qu'il y a lieu d'adopter pour obtenir le meilleur rendement du transformateur.

Si un transformateur travaillait à sa puissance nominale t heures par jour et qu'il soit sous tension le reste du temps, on démontre que le rendement sera maximum avec :

$$PF = \frac{t}{24} P_{cu} \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} PF = \text{pertes fer} \\ P_{cu} = \text{pertes cuivre} \end{array}$$

Dans une sous-station de traction, en moyenne, on admet que le transformateur débite 6 heures par jour sa charge nominale

$$\rightarrow PF = \frac{6}{24} P_{cu} \quad \rightarrow \quad PF = \frac{1}{4} P_{cu}$$

c'est seulement une solution approchée.

La protection propre de l'appareil est assurée par un relais Buchholz. C'est un relais de masse placé sur la connexion entre la cuve et la terre.

6.3.3. Groupes de conversion

Ce sont des groupes redresseurs qui équipent nos sous-stations : redresseurs au silicium, divers schémas sont utilisés pour ces groupes (Voir figure n°9).

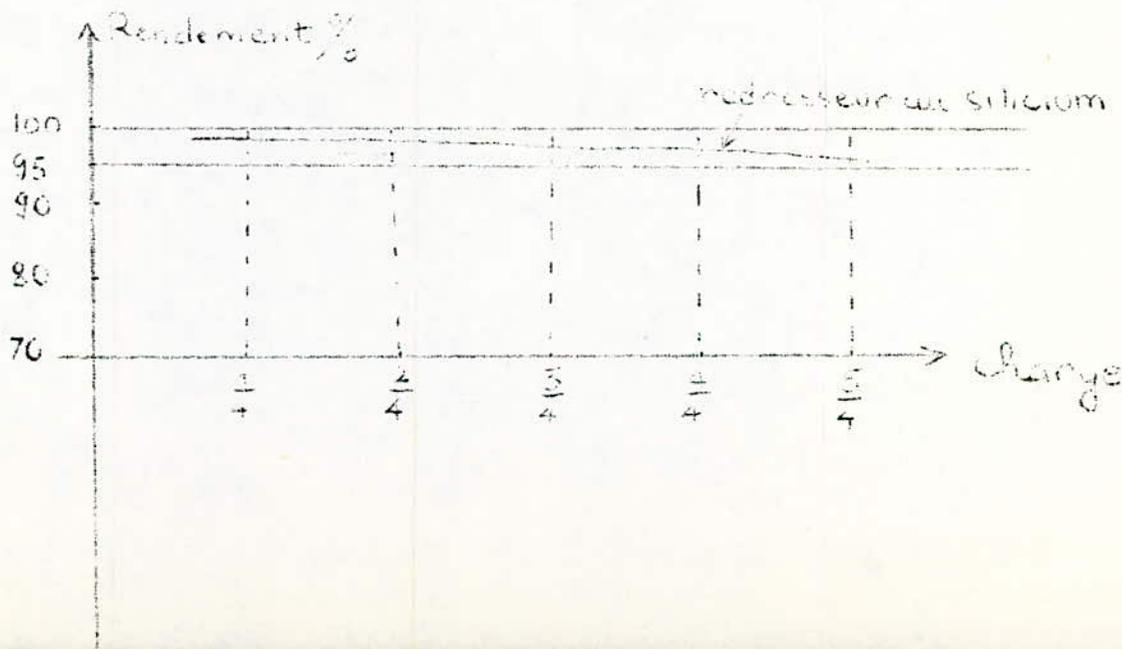
Avec les groupes au silicium, les inconvénients de chute de tension sont mineurs puisque la chute de tension dans une diode est de l'ordre de 1 volt. On peut utiliser n'importe quel couplage, mais ce sont les montages en pont de Craëtz qui permettent un dimensionnement minimum du transformateur.

On va utiliser donc le pont de Craëtz simple si l'on veut une ondulation hexaphasée et le double pont de Craëtz si l'on veut une ondulation dodécaphasée. Mais le désavantage de ce dernier est la complication du transformateur et la présence de la bobine interphase ; donc on utilise le pont de Craëtz simple.

Les redresseurs 3000 V CC - Généralités

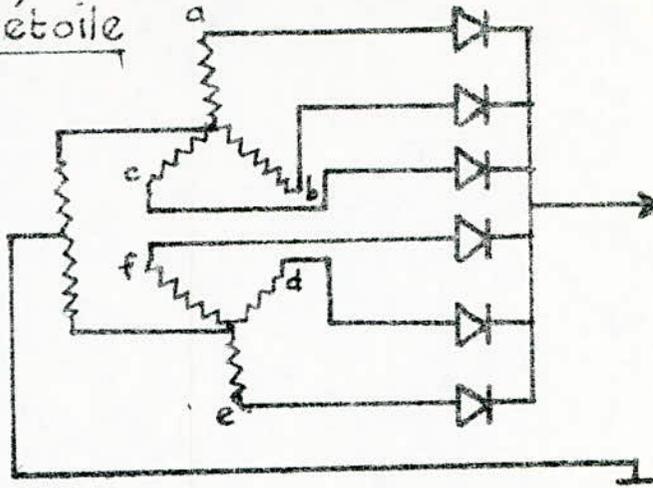
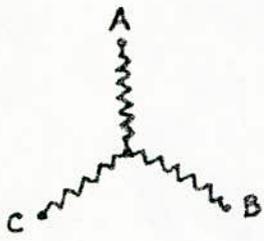
Les caractéristiques du moteur série sont tellement bien adaptées à la traction que les tractionnaires n'ont pas hésité à s'attaquer au problème du redressement du courant alternatif dont le transport est plus facile que celui du courant continu.

Le rendement de l'élément de redressement est devenu très bon (voir figure ci-dessous).



COUPLAGES A SIMPLE VOIE

Montage double étoile



Montage hexaphase simple

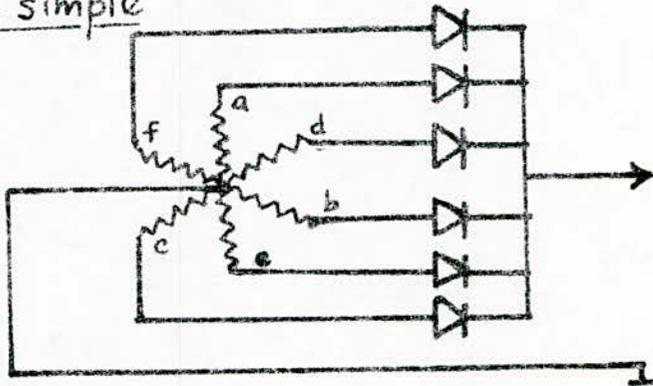
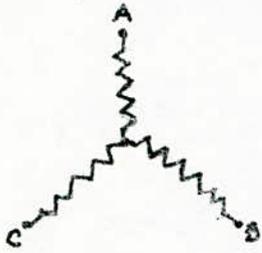
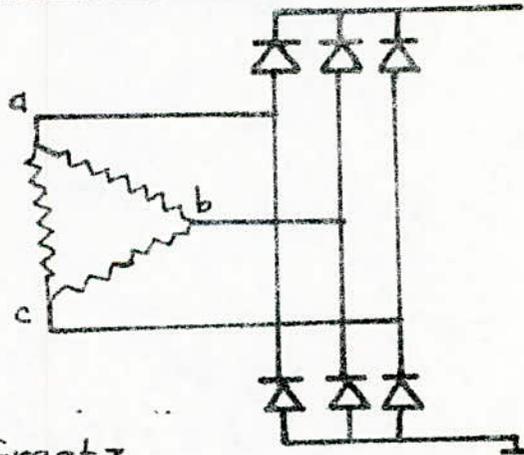
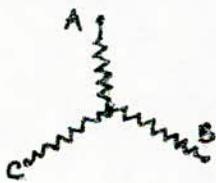


Fig- 9 a.

COUPLAGES A DOUBLE VOIE

Montage pont de Graetz



Montage double pont de Graetz

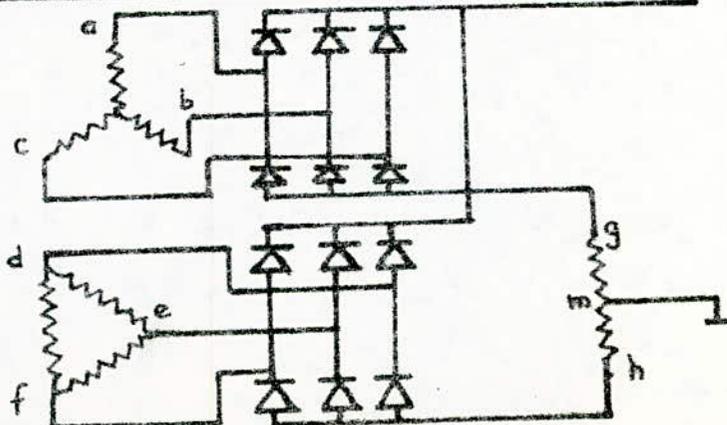
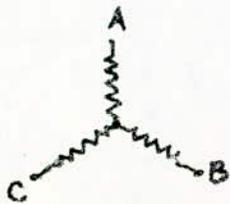


Fig-9 b.

Les pertes sont devenues relativement très réduites donc l'échauffement de même, et le logement du redresseur peut être fait dans un petit local ou une armoire métallique selon les nécessités du lieu.

Technologie du redresseur

Nous examinerons successivement :

- comment déterminer le nombre de cellules à prévoir,
- les protections nécessaires,
- le montage des cellules.

Aux conditions de surcharge que nous avons indiquées pour un groupe de traction, nous ajoutons les conditions suivantes dites d'exploitation.

* En cas de défaut externe, celui-ci doit être éliminé par des disjoncteurs des départs de la sous-station, sans arrêter le groupe.

L'ensemble des cellules doit pouvoir supporter le courant max. de court-circuit pendant la durée de l'élimination de celui-ci par un disjoncteur de départ, soit 3/1000 de seconde environ.

* Exceptionnellement, l'ensemble des cellules doit pouvoir supporter le courant max. de court-circuit sur la barre de la sous-station, pendant la durée de l'élimination de celui-ci par le disjoncteur haute tension.

On admet que cette durée est au max. 200 millisecondes.

* Lorsqu'une cellule est avariée dans une série de cellules, le groupe doit pouvoir continuer à assurer temporairement son service, cette avarie doit être signalée à l'exploitant par un signal lumineux.

Les cellules sont caractérisées par :

- leur tension inverse de crête périodique maximale,
- leur tension inverse de crête transitoire,
- leur courant direct moyen nominal.

On a beaucoup utilisé les diodes 1 000 à 1 200 V et 200 A, puis on a vu des diodes de 1 500 à 1 600 V et 250 A.

Recherchons maintenant le nombre de diodes à mettre en série puis celui des diodes à mettre en parallèle.

- Nombre de diodes à mettre en série

Dans les conditions d'exploitation :

- les parafoudres de départ avaient une tension résiduelle de 12 000 V,
- les surtensions internes du côté continu pouvaient atteindre 5 000 V,
- le groupe doit pouvoir fonctionner un certain instant avec une diode en court-circuit,
- en considérant des diodes de 1 600 V de tension inverse max. si n est le nombre de diodes à mettre en série. Alors pour le côté continu c'est la surtension 5 000 V qui va être la déterminante.

$$5 \text{ kV} < U_0 (n - 1) \text{ avec } U_0 = 1\,600 \text{ V}$$

donc : $5\,000 = 1\,600 (n - 1) \rightarrow n - 1 = 3,12 \rightarrow n = 4$ diodes en série

- Nombre de diodes à mettre en parallèle

Connaissant le courant de la charge maximum (démarrage) et ayant choisi un montage (Pont de Craëtz simple) on pourra déterminer le nombre de diodes à mettre en parallèle. Ici on suppose qu'il y a 2 trains qui démarreront au même instant donc le courant demandé est $2 \times 1\,200 = 2\,400 \text{ A}$.

$$I_{\text{max}} = 2\,400 \text{ A.}$$

Le nombre N de diodes à mettre en parallèle est $N = \frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{diode}}}$

$$\frac{2400}{250} = 9,6 \rightarrow N = 10 \text{ diodes en parallèle}$$

Les protections

Les diodes au silicium sont fragiles devant les surintensités et plus particulièrement devant les surtensions.

La figure n°0 résume toutes les protections que l'on rencontre dans un groupe de traction avec redresseur au silicium.

Examinons-les en partant de la H.T. Nous trouvons successivement :

- un relais à maxima d'intensité réglé à 3,5 In et temporisé à 0,05 s pour éviter les déclenchements par appel de courant à l'enclenchement. Il provoque l'ouverture du disjoncteur H.T. et le courant de court-circuit est éliminé dans un temps inférieur aux 180 millisecondes.

L'ouverture de ce disjoncteur est assurée dans les cas suivants :

- par un relais de surcharge monté sur le négatif et qui fonctionne si la charge est de 3 In dure plus d'une minute ;
- par un relais Buccholz, protection classique des transformateurs,
- par le relais à retour de courant placé sur le négatif.

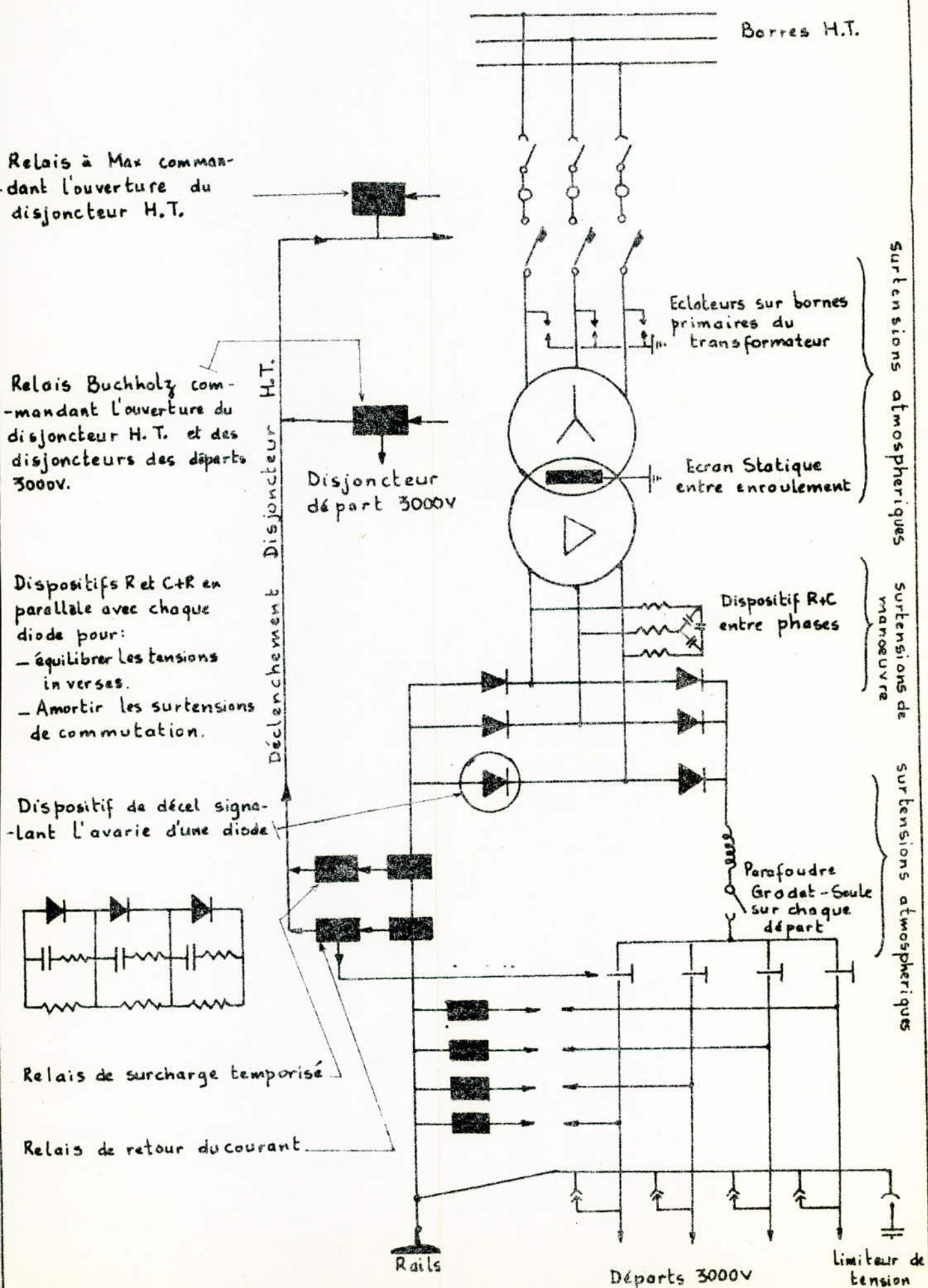
Autrefois, avec les redresseurs à vapeur de mercure pour se protéger contre les retours d'arc on disposait d'un disjoncteur sur le raccordement du groupe à la barre 3 000 V. Avec les redresseurs au silicium, on ne risque pas de retour d'arc. Il reste seulement le cas de l'amorçage à l'intérieur du groupe ; cela est tellement rare que l'on peut supprimer le disjoncteur et mettre un relais qui fera déclencher la H.T. et tous les disjoncteurs 3 000 V des départs.

Si nous poursuivons le schéma de la figure n° 10 , nous trouvons le transformateur et les diodes.

Pour réduire les surtensions venant de la H.T., nous disposons :

- d'éclateurs à pointes sur les bornes primaires,
- d'un écran statique mis à la masse et placé entre le primaire et le secondaire du transformateur. Il est destiné à réduire les surtensions atmosphériques dont la durée de front d'onde est de l'ordre du microseconde,

Sous-Station à Redresseurs au Silicium - Protections



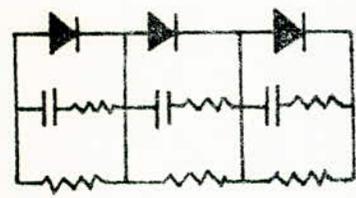
Relais à Max commandant l'ouverture du disjoncteur H.T.

Relais Buchholz commandant l'ouverture du disjoncteur H.T. et des disjoncteurs des départs 3000v.

Dispositifs R et C+R en parallèle avec chaque diode pour:

- équilibrer les tensions in verses.
- Amortir les surtensions de commutation.

Dispositif de décel signalant l'avarie d'une diode



Relais de surcharge temporisé

Relais de retour du courant

Déclenchement Disjoncteur H.T.

Disjoncteur départ 3000v

Eclateurs sur bornes primaires du transformateur

Ecran Statique entre enroulement

Dispositif R+C entre phases

Parafoudre Grodet-Soule sur chaque départ

Limiteur de tension

- de condensateurs aux bornes du secondaire pour réduire les surtensions de manoeuvre dont la durée de front d'onde est de 10 microsecondes à 1 ms. En série, on met une résistance qui amortit les oscillations dues à la commutation des diodes.

L'ensemble de ces dispositifs limite à $2 U_n$ au maximum l'amplitude des surtensions à l'arrivée sur les diodes.

Pour limiter les surtensions dues à la commutation des diodes, on place aux bornes de celles-ci un condensateur approprié avec en série une résistance d'amortissement. Cette résistance réduit les oscillations de commutation.

Enfin, on dispose d'un dispositif de décel de cellules avariées. Lorsqu'une cellule est avariée, le groupe continue à fonctionner mais il faut que l'agent d'exploitation soit averti.

Pour détecter une cellule avariée, le dispositif le plus employé, à quelque variante près, consiste à comparer les tensions entre deux points de l'ensemble qui sont au même potentiel ; s'il se produit une avarie de diode, il y a un déséquilibre que l'on peut détecter.

Compte tenu de l'expérience acquise au sujet de l'excellente tenue des diodes utilisées, on supprime tout dispositif de décel et on procède de temps à autre à une simple vérification. L'expérience montrera la cadence convenable de cette vérification.

Montage du redresseur

Tout comme un conducteur le semi-conducteur a besoin d'être refroidi.

Le redresseur est alors un châssis double face, les radiateurs sont placés dans les meilleures conditions d'évacuation de l'air chaud.

Puisque nous avons 4 diodes en série et 10 diodes en parallèle, on aura alors 40 diodes au total.

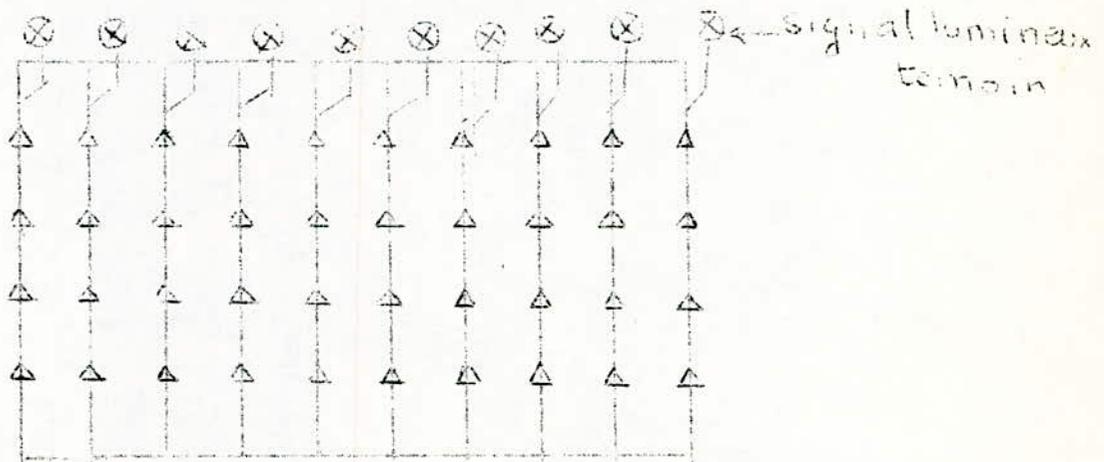


Schéma représentant la disposition des diodes pour une branche

Etant donné que le montage Pont de Craëtz simple comporte 3 branches entre positif et négatif, ceci dit le montage global comporte $3 \times 40 = 120$ diodes.

6.4. LA DISTRIBUTION AUX CATENAIRES

Dès le début du 3 kV C.C. les "départs" qui apportent aux lignes caténaires l'énergie nécessaire sont équipés avec des disjoncteurs ultra-rapides dont la plupart fonctionnent non seulement sous l'influence d'un maximum d'intensité mais aussi sous celle de $\frac{di}{dt}$.

En effet, c'est le seul critère qui permet de détecter correctement un court-circuit sur la ligne à courant continu. Les départs sont réalisés suivant deux schémas comportant :

- soit la mise en place d'un seul disjoncteur pour alimenter les deux voies situées du même côté amont ou aval de la sous-station. On a donc deux disjoncteurs de départ. Voir figure n° 11.A

- soit la séparation des deux voies en plaçant un disjoncteur pour chacune d'elles et pour chaque côté amont ou aval, on a alors quatre disjoncteurs de départ par sous-station.

Voir figure n° 11 B .

De plus, il a fallu augmenter la sécurité des déclenchements et des appareils qui concourent à l'alimentation d'une même voie sont asservis entre eux. C'est-à-dire que le déclenchement de l'un provoque le déclenchement du ou des autres.

La bonne utilisation de la section des caténaires des 2 voies impose des postes intermédiaires qui réalisent leur mise en parallèle. Certains de ces postes y ajoutent un sectionnement des caténaires pour assurer une meilleure sélection en cas de défaut (on n'isole que le secteur de voie intéressée).

Protection en courant continu :

Le disjoncteur ultra-rapide 3 000 V

C'est l'objet essentiel de la protection des départs 3 000 V. Son temps de fonctionnement sur court-circuit important est de l'ordre de 2 à 3/1 000 de seconde. C'est pourquoi on l'appelle ultra-rapide.

La protection complétée

Un disjoncteur 3 000 V a une portée limitée, c'est-à-dire qu'il n'assure plus la protection si le court-circuit est à une distance trop importante. ~~Au-delà de cette portée son fonctionnement n'est pas sûr car l'effet $\frac{di}{dt}$ devient faible.~~

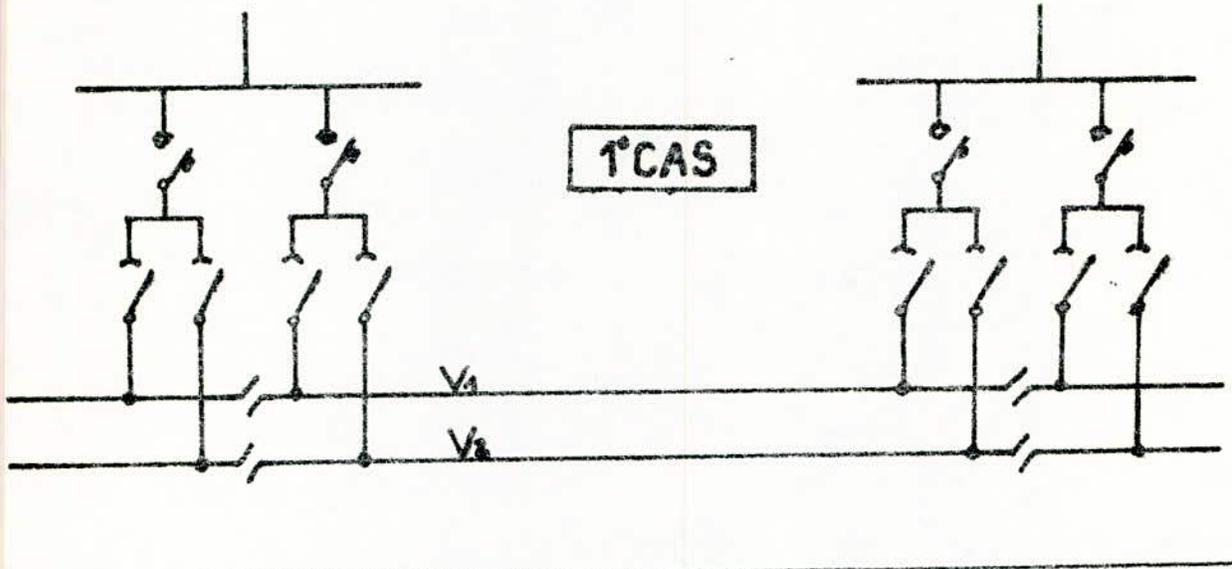
$\frac{di}{dt}$

Nous équipons le réseau de relais électroniques analysant la variation de $\frac{di}{dt}$.

SCHEMAS DE DISTRIBUTION A 3000V_{cc}

Sous station A

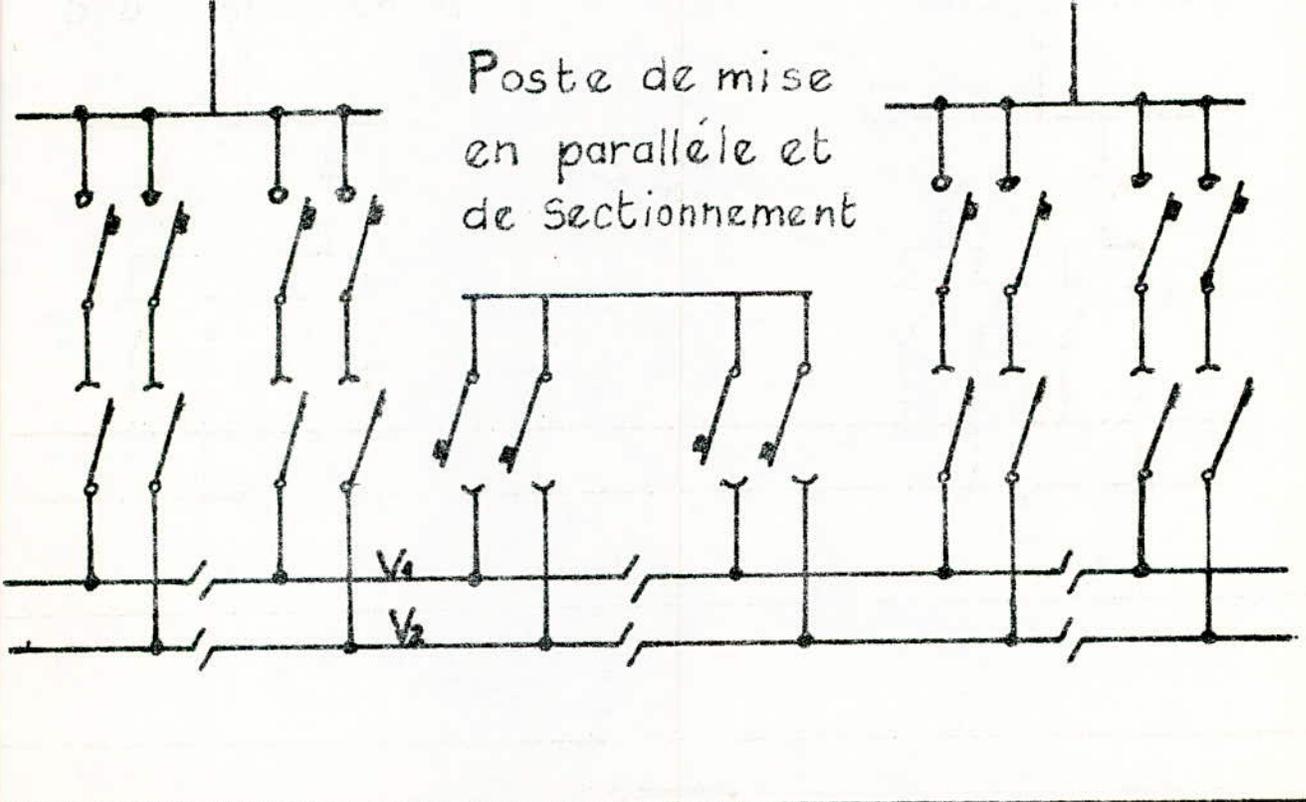
Sous station B



Sous station A

2° CAS

Sous station B



Sous l'aspect protection, il faut aussi parler des surtensions. Les surtensions venant de la caténaire sont de 2 sortes : les surtensions atmosphériques et les surtensions internes provenant des manoeuvres de coupure.

En courant continu, il s'établit avec l'amorçage provoqué par la surtension un courant très destructeur. Il faut donc se protéger en installant sur chaque départ un parafoudre limitant ce courant. L'appareil actuellement le plus répandu dans les installations S. N. T. F. est le parafoudre soule composé d'un condensateur, d'une résistance non linéaire (voir figure ci-dessous)

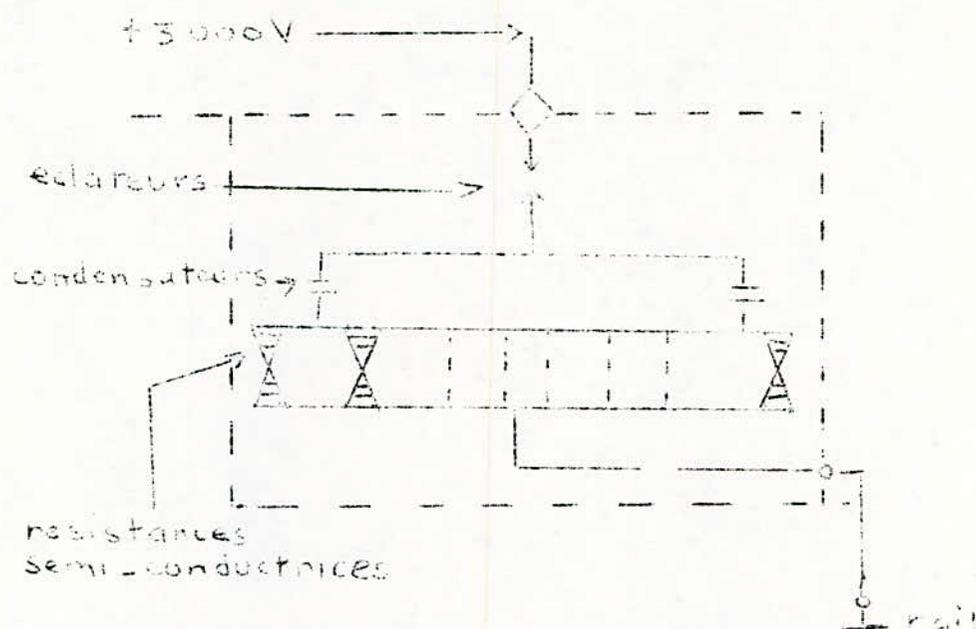


Schéma d'un parafoudre soule

Sa tension d'amorçage est assez basse de l'ordre de 6,5 kV et sa tension résiduelle de l'ordre de 10 kV.

De même, il faudrait aussi prévoir le ré-enclenchement automatique des disjoncteurs et un essai de la ligne après 3 enclenchements consécutifs.

6.5. LES SERVICES AUXILIAIRES

Les services auxiliaires en traction à courant continu assurent l'alimentation des divers circuits de contrôle en basse tension alternative et continu.

L'alternatif est fourni par un transformateur dit des services auxiliaires. Dans les sous-stations de conversion à courant continu, le transformateur est généralement branché sur les barres haute tension par l'intermédiaire d'un sectionneur. Les simplifications apportées aux circuits de contrôle de l'appareillage d'une part, l'utilisation des redresseurs au silicium d'autre part ont réduit l'importance des auxiliaires.

Or un transformateur de faible puissance branché sur la H.T. n'est pas une solution économique ni rationnelle. En conséquence, il est préférable d'avoir un transformateur branché sur le secondaire du groupe. L'inconvénient est mineur.

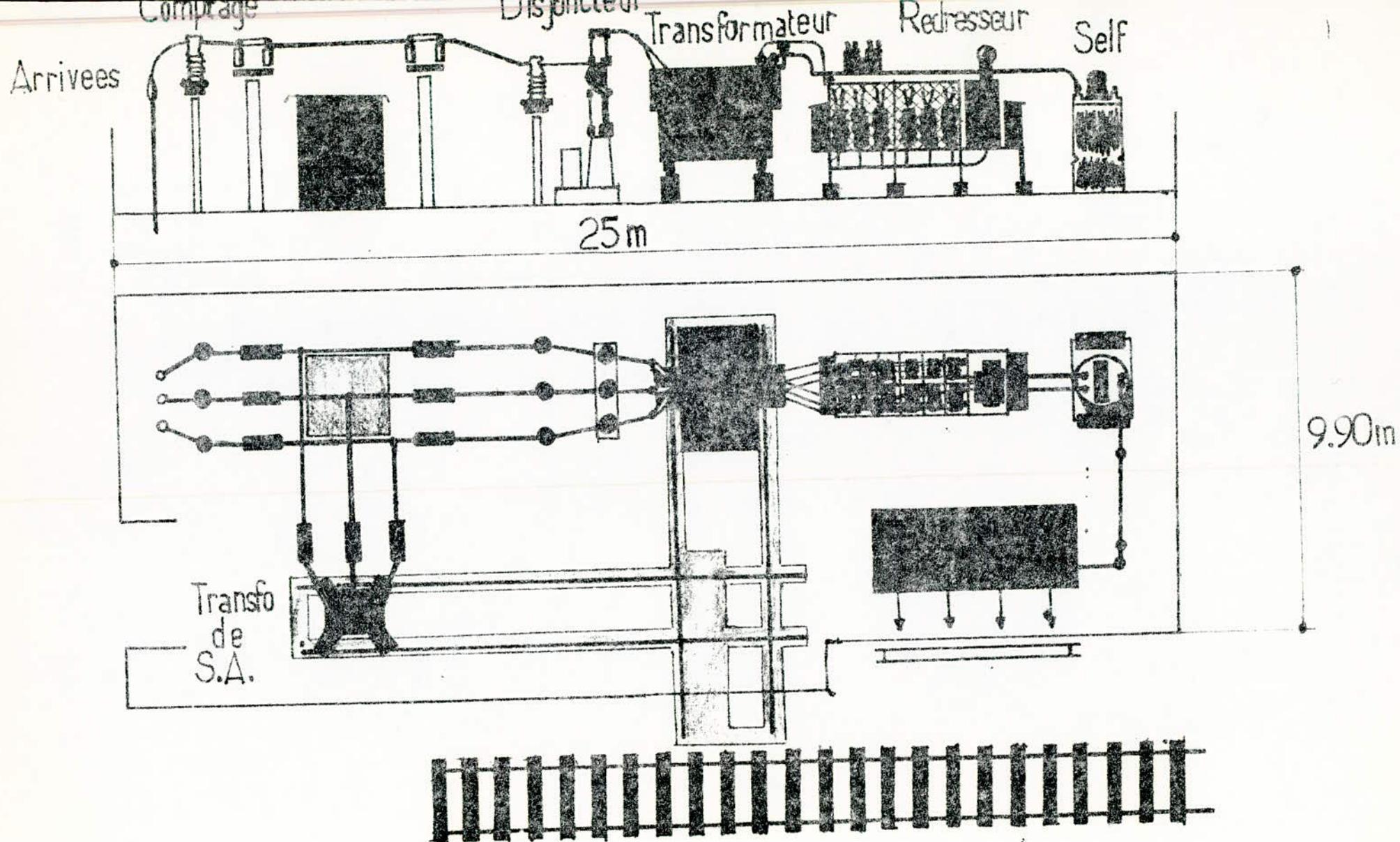
On conservera le transformateur branché sur la H.T. lorsque l'on devra assurer l'alimentation d'installations extérieures à la sous-station (pour la signalisation, une gare ou un atelier..) ce qui donnera une puissance valable économiquement pour un tel branchement. Cependant SONELGAZ exige maintenant un disjoncteur pour protéger le transformateur et ceci diminue la rentabilité des fournitures extérieures.

Les batteries utilisées sont des cadmiun-nickel. On dispose évidemment de chargeurs statiques.

6.6. AGENCEMENT GENERAL DES SOUS-STATIONS

La figure n°2 donne le plan d'ensemble d'une sous-station. Elle comporte une arrivée H.T. parcâbles souterrains. Dans ce cas, seul le transformateur a une voie de manutention. Le redresseur et la self de lissage sont simplement placés sur massif.

L'installation des divers éléments constituant la sous-station doivent répondre à certaines règles destinées à assurer la sécurité du personnel d'exploitation ou d'entretien.



SOUS-STATION DE TRACTION A REDRESSEURS AU SILICIUM

En particulier, sont ainsi fixées les distances minima auxquelles doivent être placées les pièces sous tension pour permettre la circulation du personnel. Si cela ne peut être respecté, il faut installer des grillages de protection verrouillés ou cadenassés.

De même, on doit disposer l'appareillage et les connexions de telle sorte que l'agent qui travaille sur un appareil consigné, les autres parties de l'installation qui restent sous tension sont au moins à 3 mètres de l'appareil intéressé.

Une autre condition de sécurité : c'est la mise à la terre de toutes les ferrures ou charpentes supportant du matériel pouvant être mis sous tension.

Il faut noter, des dispositions particulières sont à prévoir dans les installations à courant continu 3 000 V, sous-stations et postes. En effet, le négatif est relié au rail de roulement de la voie et ne peut pas être relié à la terre pour éviter que le courant de retour circulant dans le sol provoquant, par corrosion, des détériorations des conduites métalliques diverses qui seraient placées sur leur passage.

D'autre part, pour provoquer le plus rapidement possible en cas de défaut le déclenchement des disjoncteurs correspondants, les charpentes portant des appareils raccordés à des circuits 3 000 V sont reliées au négatif. Comme il faut éviter, en cas d'incident que ces charpentes soient portées à une tension élevée, on place entre le négatif et le réseau de terre un limiteur de tension (éclateur).

6.7. EFFETS DE LA TRACTION ELECTRIQUE SUR LES CANALISATIONS ET LES LIGNES DE TELECOMMUNICATIONS VOISINES

Effet de la corrosion du courant continu circulant dans le sol

Quel que soit le soin apporté à l'isolement des rails par rapport au sol la totalité du courant de traction ne revient pas par les rails ; c'est-à-dire qu'une partie du courant emprunte spécialement les canalisations métalliques enterrées : conduite d'eau ou de gaz, égouts, enveloppes métalliques des câbles de télécommunications, c'est ce qu'on appelle les courants vagabonds. Ces canalisations risquent d'être soumises à des effets destructeurs par électrolyse au point où le courant sort de la canalisation pour regagner le sol (en d'autres termes la canalisation joue le rôle d'anode). Le plus grand nombre de ces points est au voisinage des sous-stations.

Un premier remède consiste évidemment à limiter les courants vagabonds c'est-à-dire à diminuer la résistance électrique des rails par exemple (qui est obtenu par éclissage électrique).

La deuxième catégorie des remèdes consiste à mettre autant que possible les canalisations à l'abri des corrosions dues aux courants vagabonds.

L'isolation des conduites serait un remède mais trop onéreux pour pouvoir être systématique. Ajoutons que si l'isolant venait à présenter un défaut dans une région où les courants vagabonds ont tendance à sortir de la conduite, il se produirait alors en ce point une concentration de corrosion très dangereuse.

Les remèdes recommandés consistent à immuniser les canalisations en les rendant électro-négatives par rapport au sol qui les entoure (remède valable pour fer, cuivre, plomb, etc...), c'est ce qu'on appelle "protection électrique" qui comprend le drainage, la protection cathodique et le soutirage.

Tous les procédés de protection électrique nécessitent un examen d'ensemble très complet de la situation topographique des câbles et canalisations à protéger.

Dans l'ensemble, la protection cathodique s'est avérée comme un des procédés les plus efficaces.

VII - SOUS-STATIONS EN COURANT 25 kV 50 Hz

7.1. GENERALITES ET ALIMENTATION H.T.

Comme cela a déjà été signalé en courant continu, les sous-stations de traction sont des points de passage offerts de place en place à l'énergie pour alimenter les lignes de contact ; elles opèrent la liaison entre le réseau H.T. qui fournit l'énergie primaire (réseau public ou réseau spécial) et la caténaire à laquelle elles fournissent le courant de traction.

Dans une sous-station, on trouvera donc :

- une partie H.T. de raccordement au réseau primaire,
- un ou plusieurs "groupes de traction" qui transforment la tension,
- des auxiliaires,
- un poste de commande,
- des départs de courant de traction vers les lignes de contact, souvent nommés "feeders".

En monophasé 50 Hz le réseau primaire est le réseau public triphasé, les groupes de traction sont des transformateurs, mais qui sont quelque fois assemblés suivant des schémas spéciaux, en vue de réduire les déséquilibres produits sur le réseau primaire par les prélèvements monophasés.

La sous-station est reliée au poste de transformation du réseau public le plus voisin (par une ou deux lignes d'alimentation). Quand la distance poste de transformation du réseau public est faible (quelques kilomètres), on peut se dispenser généralement d'installer des disjoncteurs sur les arrivées H.T. Mais la SONELGAZ dans ses directives exige des disjoncteurs et des sectionneurs sur les arrivées H.T.

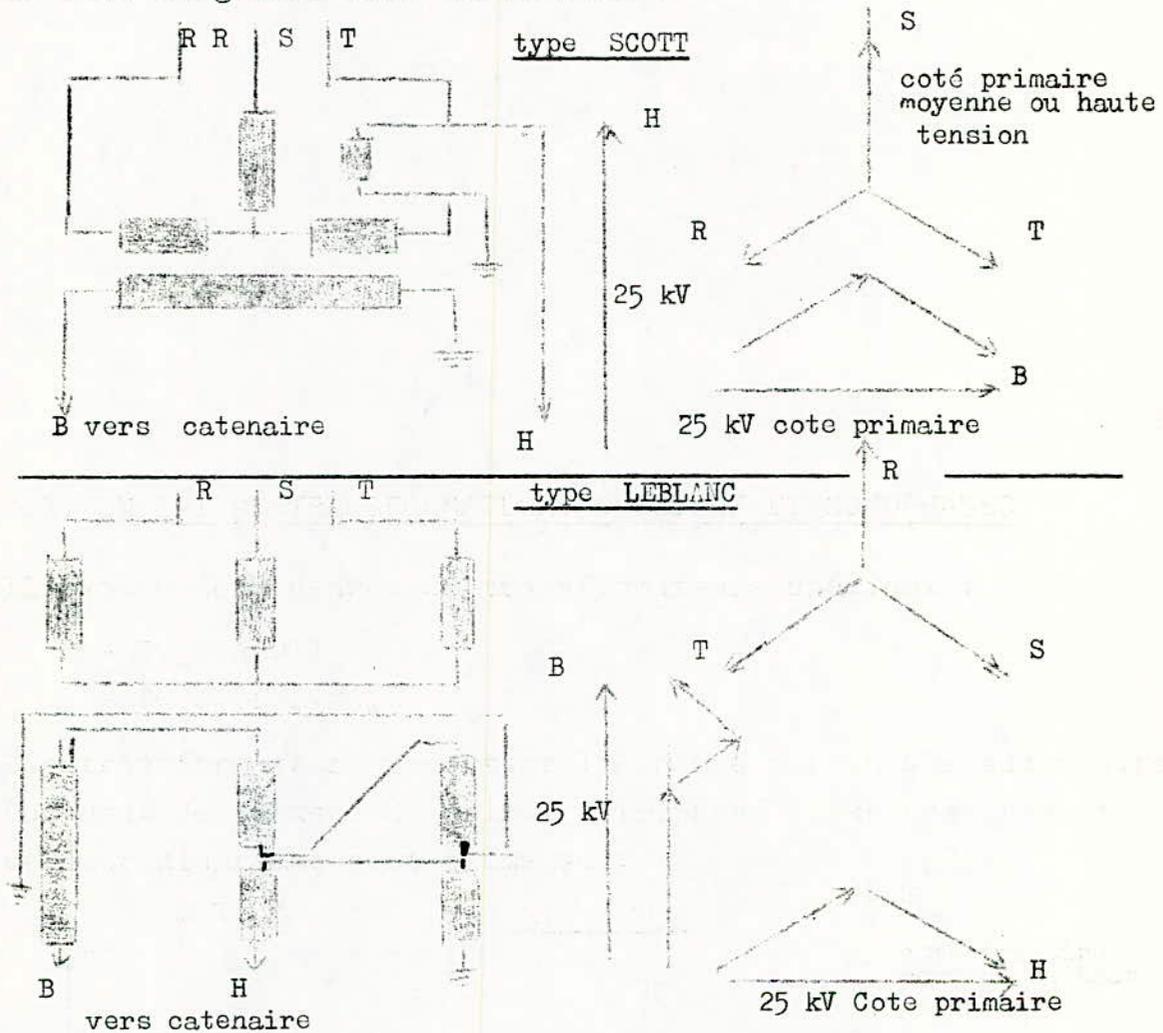
La SONELGAZ dispose d'un réseau de 30 kV mais en considération des puissances modérées transmises par ce réseau, il sera préférable de brancher les sous-stations de traction sur le réseau 63 kV.

7.2. EMPLOI DE TRANSFORMATEURS SPECIAUX ET MONOPHASES

Il existe deux genres de transformateurs spéciaux :

- Type SCOTT
- Type LEBLANC.

Ces transformateurs reportent la charge monophasée secondaire sur deux des phases du primaire triphasé. Leur branchement et leur diagramme sont comme suit :



Dans ces 2 transformateurs, le secondaire livre deux tensions alternatives déphasées de $\pi/2$. Par suite les caténaires doivent être séparées au moins en 2 sections (autant que possible même charge). Ces types de transformateurs ne sont installés que lorsque le réseau d'alimentation ne permet pas une charge sur une seule phase.

Le plus simple et le plus économique est bien sûr le transformateur monophasé. Si l'on suppose que deux sous-stations (voir paragraphe 7.3.1.) monophasées sont raccordées à une ligne triphasée, le plus grand déséquilibre se produit quand une sous-station est en panne ou quand le trafic est arrêté sur une des zones alimentées. L'autre sous-station fonctionnera avec une surcharge de 100 %. En prenant une puissance nominale de 10 MVA (voir paragraphe 7.5.3. b) par sous-station, on obtient une sous-station chargée avec 20 MVA et une non chargée. Ce qui nous ferait une trop grande concentration d'énergie en un point. Par ailleurs un important déséquilibre en résulterait au niveau du réseau de distribution de la SONEGAS et en particulier, affecterait les moteurs asynchrones. Pour cela et en accord avec le service de la H.T. de cette société qui nous a signifié son désaccord au sujet d'un tel déséquilibre (10 MVA , 20 MVA , en cas de panne d'une sous-station) nous avons opté pour le montage SCOTT b que celui-ci présente les inconvénients suivants :

- Les pertes sont plus élevées que dans un transformateur monophasé simple,
- transformateur plus cher ,
- moins grande souplesse d'exploitation .

Remarque

Le transformateur LEBLANC possède les mêmes propriétés que le groupe SCOTT. Si ce dernier a été préféré par les sous-stations 50 Hz, c'est que, le transformateur LEBLANC, étant un appareil unique, exige que la réserve ait un appareil semblable, tandis qu'en cas d'avarie sur un élément SCOTT on conserve l'alimentation sur l'autre pont et on peut, comme nous le verrons en annexe II page 74, rétablir l'alimentation complète en prévoyant seulement un élément "base" de réserve .

7.3. NOMBRE ET LOCALISATION DES SOUS-STATIONS

7.3.1. Nombre des sous-stations

Le réseau de la SONELGAZ nous permet une alimentation des postes du HAMMA et de celui de ROUIBA Industriel.

Pour plus de sécurité, on a préféré une alimentation double à partir de ces deux postes. Il revient à la S. N. T. F. d'entreprendre la pose d'un câble 63 kV le long de la ligne entre CARROUBIER et ROUIBA Industriel (environ 20 km) (Voir paragraphe 7.3.2.1.).

Pour déterminer le nombre de sous-stations nécessaires au réseau, il est nécessaire de prendre en considération les facteurs suivants :

- chute de la tension en ligne max. (la chute moyenne, on ne peut la calculer),
- puissance installée par sous-station,
- fiabilité.

Du point de vue des chutes de tension en 25 kV une seule sous-station suffirait, mais divers paramètres sont à considérer :

- panne de la sous-station,
- trop grande concentration de puissance en un point (généralement on évite les charges de plus de 10 000 kW),
- déséquilibres causés par des grandes sous-stations.

Pour ces diverses raisons, on assumera 2 sites dont le positionnement dépendra des possibilités de raccordement au réseau SONELGAZ, et surtout de la chute de tension maximale sur la ligne de traction. Pour ce dernier point, on considère le moment le plus défavorable, c'est-à-dire que la plus grande chute de tension dans le réseau advient lorsque deux trains démarrent simultanément à l'extrémité de la ligne, ce qui revient à considérer un train démarrant en bout de ligne sur une voie. On peut vérifier du graphique d'exploitation (graphe n°5) que la charge

la plus défavorable intervient lorsqu'un train démarre de TAFOURAH ou de l'USTA par exemple. Le cas le plus improbable d'une surcharge encore plus grande, le disjoncteur du feeder concerné fonctionne et protège la section.

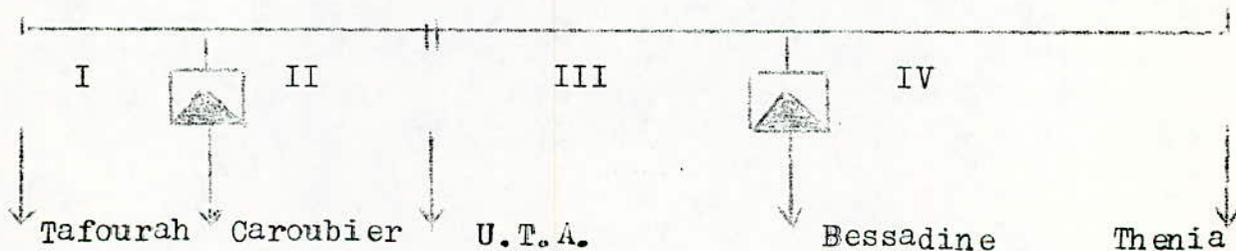
7.3.2. Localisation des sous-stations

Comme il a déjà été mentionné, la localisation dépendra essentiellement des postes SONELGAZ et des chutes de tension. La puissance des trains au démarrage est de l'ordre de 3 600 kW (calculée au paragraphe 5.1.). Nous avons assumé $\cos \phi = 0,9$. Nous choisissons deux variantes.

7.3.2.1. Première variante



7.3.2.2. Deuxième variante



7.4. CHUTES DE TENSION EN COURANT ALTERNATIF

7.4.1. Impédance kilométrique

Par rapport au courant continu, des différences importantes s'introduisent :

- on ne considère plus la résistance du circuit mais son impédance (une augmentation du cuivre n'agit que sur R),
- on ne considère plus uniquement la grandeur de l'intensité absorbée par un train, mais également le facteur de puissance de la locomotive ($\cos \phi$).

Quant à nous, et sans entrer dans les détails, on considérera* :

Constitution de la caténaire	Impédance kilométrique boucle - caténaire - sol (Ω) Double voie (2 caténaires + 2 voies)
Porteur : 50 mm ² Cu ou 65 mm ² bronze Contact : 100 mm ² Cu	$0,084 + j 0,278 =$ $0,290 \ /73^\circ$

donc : $Z = 0,290 \ /75^\circ \ \Omega/\text{km}$.

7.4.2. Calcul des chutes de tension

Pour les deux variantes, le cas le plus défavorable est le démarrage d'un train de THENIA donc :

$$\Delta U = \frac{0,29 \cdot 19,8 \cdot 3\ 600}{25 \cdot 0,9} = 919 \text{ V}$$

$$\Delta U = 3,6 \% U.$$

* Cours de traction électrique par M. GARREAU, page 41.

Si la sous-station 2 tombe en panne et en admettant que 2 trains démarrent ensemble, la chute max. sera :

$$\Delta U = \frac{0,29 \cdot 43,7 \cdot 2 \cdot 3\ 600}{25 \cdot 0,9} = 4\ 055\ \text{V}$$

$$\Delta U = 16\ \% \ U.$$

La chute max. de tension est acceptable en regard des tensions minimales admises par l'U.I.C. Pour 25 kV 50 Hz, un minimum de 19 kV (ou 17,5 kV instantané) est admis.

Remarque : Pour notre cas, le facteur départageant les deux variantes sera la puissance de chaque sous-station.

7.5. CALCUL DE LA CONSOMMATION TOTALE

La consommation totale est donnée par la formule suivante :

$$Q = \frac{N \cdot P \cdot q}{1\ 000}$$

N = trains kilomètres par heure de pointe

P = masse moyenne du train

Q = consommation en Wh/tonne-km.

Le nombre de trains kilomètres par heure de pointe N nous est donné par le graphique de marche (Voir graphe n° 5).

La masse moyenne P du train a été calculée en page 23 et est de P = 455 tonnes.

La consommation moyenne q en fonction de la distance a été relevée de la courbe n° 6 qui donne la consommation en fonction de la distance entre arrêts (Voir ANNEXE 1).

Nous allons maintenant calculer pour chaque tronçon et chaque sous-station la consommation totale.

7.5.1. Consommation moyenne pour chaque tronçonA/ Première variante

1. TAFOURAH - DIAR EL DJEMAA

Distance (km)	Consommation moyenne (Wh/t. km)	Distance.Consommation moyenne
2,43	33,2	80,6
0,63	76,0	47,8
1,09	55,0	59,9
1,48	42,5	62,9
0,60	0,75	0,45
<u>1,29</u>	<u>50,0</u>	<u>64,5</u>
9,52	////	316,2

La consommation sur ce tronçon sera :

$$q_1 = \frac{316,2}{9,52} = 33,23 \text{ Wh/tonne.km}$$

En calculant de la même manière pour les autres tronçons, nous aurons :

2. DIAR EL DJEMAA - DAR EL BEIDA

$$q_2 = 41,04 \text{ Wh/tonne.km}$$

3. DAR EL BEIDA - BESSADINE

$$q_3 = 35,4 \text{ Wh/tonne.km}$$

4. BESSADINE - THENIA

$$q_4 = 27,33 \text{ Wh/tonne.km}$$

B/ Deuxième variante

De la même manière qu'en A, on aura :

1. TAFOURAH - CAROUBIER

$$q'_1 = \frac{251}{6,23} = 40,3 \text{ Wh/tonne.km}$$

2. CAROUBIER - USTA

$$q'_2 = \frac{344,3}{8,18} = 42,09 \text{ Wh/tonne.km}$$

3. USTA - BESSADINE

$$q'_3 = \frac{626,9}{17,1} = 36,66 \text{ Wh/tonne.km}$$

4. BESSADINE - THENIA

$$q'_4 = \frac{541,7}{19,81} = 27,33 \text{ Wh/tonne.km}$$

7.5.2. Nombre de trains-km pour chaque tronçon

A/ Première variante

1. TAFOURAH - DIAR EL DJEMAA

$$N_1 = 278 \text{ trains.km}$$

2. DIAR EL DJEMAA - DAR EL BEIDA

$$N_2 = 302 \text{ trains.km}$$

3. DAR EL BEIDA - BESSADINE

$$N_3 = 201,64 \text{ trains.km}$$

4. BESSADINE - THENIA

$$N_4 = 288,4 \text{ trains.km}$$

B/ Deuxième variante

1. TAFOURAH - CAROUBIER

$$N'_1 = 232,87 \text{ trains.km}$$

2. CAROUBIER - USTA

$$N'_2 = 247 \text{ trains.km}$$

3. USTA - BESSADINE

$$N'_3 = 302 \text{ trains.km}$$

4. BESSADINE - THENIA

$$N'_4 = 288,4 \text{ trains.km}$$

7.5.3. Calcul de la consommation totale

Ce calcul est fait en kWh par heure de pointe donc équivalente (la consommation) à la puissance en kW.

A/ Première variante

$$Q_1 = \frac{N_1 \cdot P \cdot q_1}{1\ 000} = \frac{278 \cdot 455 \cdot 33,23}{1\ 000} = 4\ 203,36 \text{ kW}$$

$$Q_2 = \frac{N_2 \cdot P \cdot q_2}{1\ 000} = \frac{302 \cdot 455 \cdot 41,04}{1\ 000} = 5\ 639,30 \text{ kW.}$$

donc la puissance de la sous-station 1 sera :

$$Q_I = 4\ 203,36 + 5\ 639,30 = 9\ 842,66 \text{ kW.}$$

$$Q_3 = \frac{N_3 \cdot P \cdot q_3}{1\ 000} = \frac{201,64 \cdot 455 \cdot 35,40}{1\ 000} = 3\ 247,8 \text{ kW}$$

$$Q_4 = \frac{N_4 \cdot P \cdot q_4}{1\ 000} = \frac{288,4 \cdot 455 \cdot 27,33}{1\ 000} = 3\ 586,2 \text{ kW}$$

donc la puissance de la sous-station 2 sera :

$$Q_{II} = 3\ 247,8 + 3\ 586,2 = 6\ 834,0 \text{ kW.}$$

B/ Deuxième variante

$$Q'_1 = \frac{N'_1 \cdot P \cdot q'_1}{1\ 000} = \frac{232,87 \cdot 455 \cdot 40,3}{1\ 000} = 4\ 270,0 \text{ kW}$$

$$Q'_2 = \frac{N'_2 \cdot P \cdot q'_2}{1\ 000} = \frac{247 \cdot 455 \cdot 42,09}{1\ 000} = 4\ 730,2 \text{ kW}$$

donc la puissance de la sous-station 1 sera :

$$Q'_I = 4\ 270,0 + 4\ 730,2 = 9\ 000,2 \text{ kW}$$

$$Q'_3 = \frac{N'_3 P. q'_3}{1\ 000} = \frac{302. 455. 36,66}{1\ 000} = 5\ 037,4 \text{ kW}$$

$$Q'_4 = \frac{N'_4 P. q'_4}{1\ 000} = \frac{288,4 . 455 . 27,33}{1\ 000} = 3\ 586,2 \text{ kW}$$

donc la puissance de la sous-station 2 sera de :

$$Q'_{II} = 5\ 037,4 + 3\ 586,2 = 8\ 623,6 \text{ kW.}$$

7.6. CONCLUSION, CHOIX DE LA VARIANTE ET DE LA PUISSANCE DES TRANSFORMATEURS

7.6.1. Choix de la variante

Les chutes de tension dans les deux variantes étant acceptables, notre choix, ne pourra être dicté que par le souci d'une bonne répartition de la charge et d'une non grande concentration d'énergie en un point donné.

Variante 1	$Q_I = 9\ 842,66 \text{ kW}$
	$Q_{II} = 6\ 834,0 \text{ kW}$

Variante 2	$Q'_I = 9\ 000,2 \text{ kW}$
	$Q'_{II} = 8\ 623,6 \text{ kW.}$

D'après ces valeurs, on remarque que la seconde variante permet une répartition moins désordonnée d'énergie entre les deux sous-stations et qui de plus nous permet d'avoir des transformateurs de même puissance dans les deux sous-stations, ce qui facilite et uniformise le problème de la réparation, pièces détachées, etc....

7.6.2. Choix de la puissance des transformateurs

Les moteurs d'un train ont une puissance nominale de 2 400 kW. Comme on assume que le train au démarrage peut consommer 1,5 sa puissance nominale, et en admettant le cas défavorable (extrême) de deux trains démarrant simultanément, la puissance demandée sera de :

$$\frac{2\ 400 \times 2 \times 1,5}{0,9} = 8\ 000 \text{ kVA.}$$

En assumant que les pertes de puissance dans la caténaire et les services de la sous-station seront 5 % de la puissance de traction maximum ; alors la puissance totale à la sous-station sera de :

$$8\ 000 \times 1,05 = 8\ 400 \text{ kVA.}$$

Comme on a admis pour les sous-stations des transformateurs acceptant une surcharge de 100 %, alors :

$$\frac{8\ 400}{2} = 4\ 200 \text{ kVA.}$$

Dans la deuxième variante, on a deux transformateurs de 9 500 kVA donc un transfo de 4 750 kVA, on choisira donc des transformateurs de 5 MVA.

7.7. CONSTITUTION ET BRANCHEMENT

La tension est transformée de 63 kV à 25 kV dans les sous-stations.

Les sous-stations sont composées de 3 transformateurs de 5 MVA en montage SCOTT. Pour tenir compte des très fortes fluctuations de la charge des zones alimentées, les transformateurs doivent pouvoir supporter pendant un court instant des pointes de courant atteignant le double de la valeur nominale.

En plus des parties énumérées au paragraphe 7.1., on trouve dans une sous-station des pièces annexes.

Les pièces annexes sont indispensables pour les relais de protection et la télécommande, pour les batteries, pour les auxiliaires, les installations de télécommunications, ainsi que pour les ateliers, magasins et installations sanitaires.

On a également besoin d'un raccordement routier, d'embranchement ferroviaire, d'un câble de télécommunications, d'un raccordement avec les circuits d'eau potable et d'évacuation d'eaux usées.

Les sous-stations étant télécommandées, les salles de commande ne sont occupées qu'en cas exceptionnel et peuvent être ainsi de faibles dimensions (voir Chapitre IX).

Pour l'exploitation, il est nécessaire de pouvoir effectuer les manoeuvres suivantes par la télécommande dans les sous-stations sans personnel :

- branchement et coupure ainsi que mise à la terre des lignes à 63 kV,
- commande du sectionneur de la barre à 63 kV,
- branchement et coupure des feeders à 25 kV,
- branchement et coupure des transformateurs,
- commande du système de vérification de la caténaire.

Tous les disjoncteurs et presque tous les sectionneurs doivent donc être télécommandables. Du côté 25 kV une signalisation suffit pour le sectionneur de barre.

Le courant est conduit des lignes 63 kV aux barres de distribution par un disjoncteur. Chaque ligne à 63 kV peut être mise à la terre et court-circuitée, ce qui facilite les travaux d'entretien. Le disjoncteur peut couper en charge les dérivations des barres de distribution qui sont toujours sous tension. En cas de surcharge ou de court-circuit, les disjoncteurs s'ouvrent automatiquement.

Les transformateurs fonctionnent indifféremment en couple (B_1, B_2) ; dans le cas d'une panne de B_1 ou de B_2 , alors on aura le couple (B_2, H) ou (B_1, H), on placera en amont des transformateurs B_1 et B_2 deux interrupteurs brusques.

Des sectionneurs sont également indispensables sur les circuits à 63 kV entre le disjoncteur d'arrivée et la ligne, car celle-ci reste sous tension en cas de travaux sur le disjoncteur.

Les feeders d'alimentation de la caténaire sont reliés aux barres de distribution par un disjoncteur. Une résistance de vérification **est utilisée** pour vérifier une zone d'alimentation qui a disjonctée.

Les installations de distribution à 63 kV sont en plein air, ce qui permet d'avoir une construction moins chère. Une telle installation demande par contre une plus grande surface au sol, car la distance entre les conducteurs et la terre doit être plus grande. De même les installations de distribution à 25 kV sont en plein air.

Les sectionneurs, les barres de distribution et les disjoncteurs sont placés dans une salle commune et séparés par de minces cloisons ou du grillage. Par mesure d'économie, on a placé à l'entrée des transformateurs B_1 et B_2 un interrupteur brusque.

(voir schema n° 13 et 14).

7.7.1. Installation de terre

A/ Constitution de la terre de protection

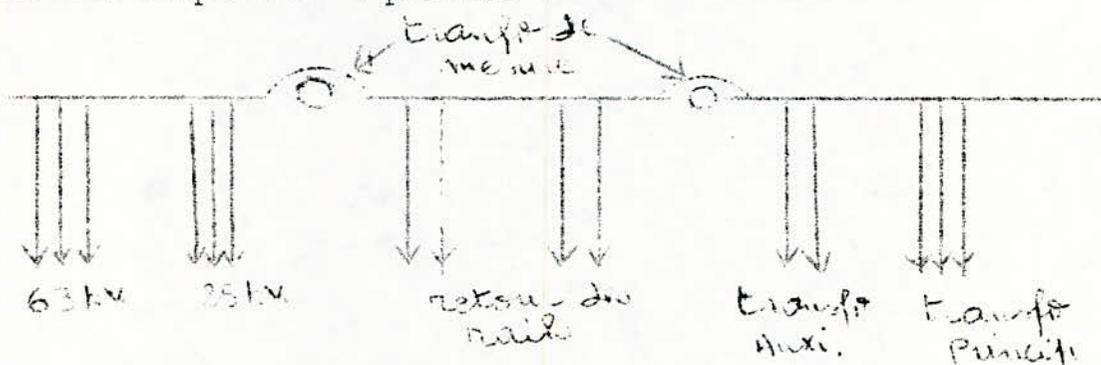
Toutes les constructions métalliques et les moyens d'exploitation qui ne sont pas inclus dans les circuits d'exploitation, mais qui peuvent être le siège de tension de défaut dangereuse sont à relier à la terre de protection. Cette liaison s'effectue par des câbles, des barres ou des rails reliés à des bandes métalliques zinguées au feu, placées en terre circulairement autour de l'installation. Cette terre est généralement séparée pour la haute et basse tension.

Ces circuits de terre sont généralement constitués de bandes métalliques ou de profils métalliques circulaires zingués au feu. Les liaisons doivent être visibles, protégées contre les endommagements mécaniques ou chimiques et être repérées sans risque de confusion.

La terre des circuits de protection contre les surtensions est également reliée à la terre de protection ainsi que les transformateurs de mesure de la tension. Les paratonnerres y sont également reliés.

B/ Constitution de la terre d'exploitation

La terre d'exploitation est formée par la liaison entre le borne U du transformateur des sous-stations et les rails. On utilise des câbles souterrains pour cette liaison. Celle-ci arrive au milieu d'une barre collective dite barre neutre comportant 3 parties :



Donc tous les câbles reliés aux transformateurs aboutissent à une partie extérieure de la barre neutre. L'enroulement du transformateur de mesure placé entre les deux - appelé transfo de mesure de courant de somme - mesure le courant de retour total.

Le retour du courant traction ne s'effectue pas en totalité par les rails, mais 30 à 60 % de ce courant suit un autre chemin par la terre et la terre de protection à la barre neutre.

C/ Dimensionnement

Les installations de terre sont à dimensionner de telle sorte qu'elles puissent conduire le courant max. permanent, et que, lors d'une anomalie, les courants de défaut puissent être supportés sans qu'il en résulte de tension de contact dangereuse pour l'utilisateur.

7.8. INSTALLATIONS AUXILIAIRES

Chaque sous-station a besoin pour la commande, la télécommande, les installations de surveillance et de protection, l'éclairage, la charge des batteries, ainsi que le chauffage des différentes installations. Une partie de ces installations doit rester en service même lorsque le courant de traction vient à manquer. On a donc besoin d'un groupe électrogène de secours. On doit avoir à sa disposition les tensions suivantes pour les installations auxiliaires :

1. 220 V 50 Hz monophasé.

On alimente ainsi l'éclairage, le chauffage et les redresseurs pour charger les batteries 220 V = et 60 V =

2. 220 V.

On alimente ainsi l'éclairage de secours, les circuits de commande et de surveillance pour la distribution, ainsi que des organes de protection.

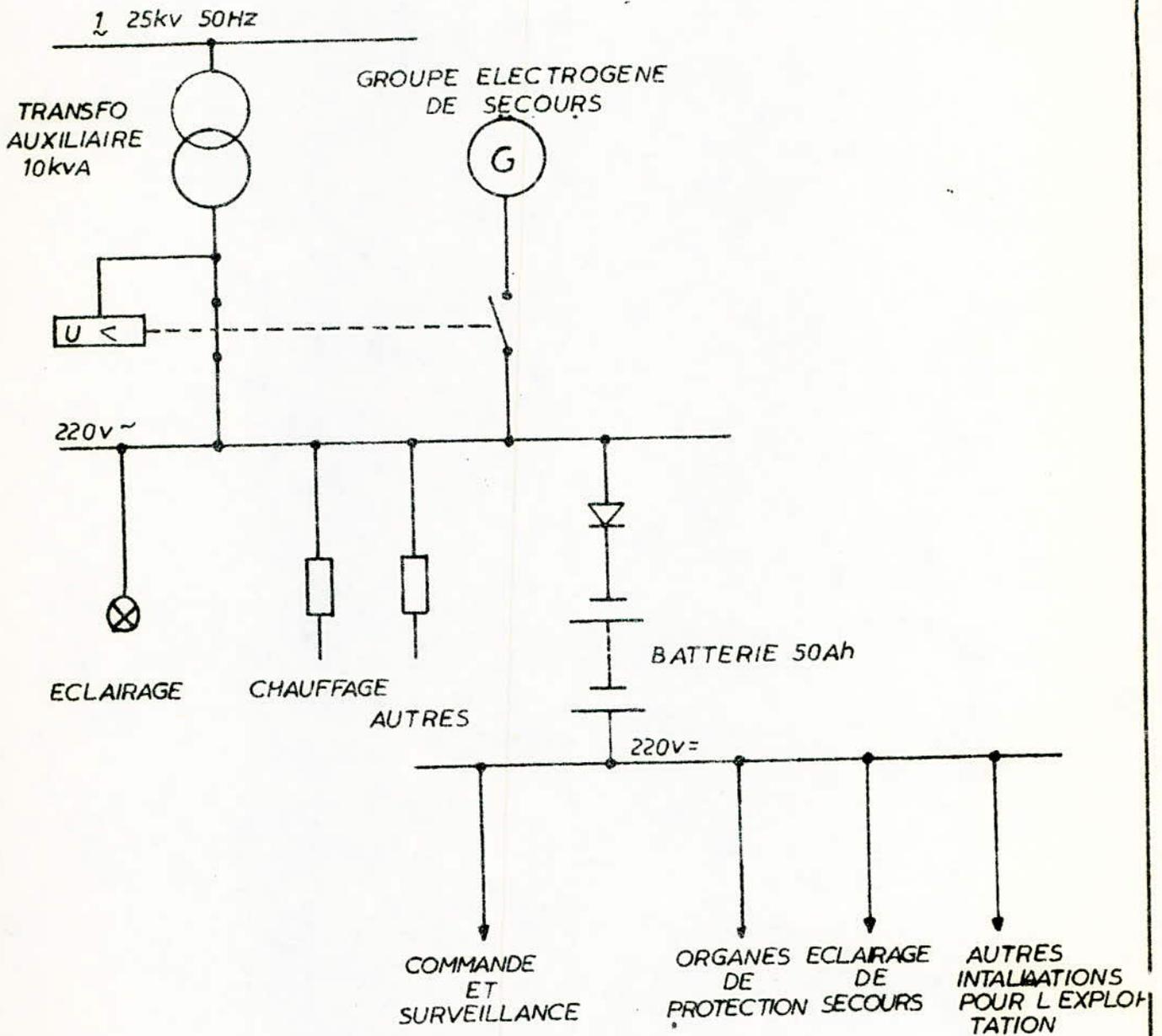
3. 60 V.

On alimente ainsi quelques autres organes de protection, la télécommande et la télémesure (Voir schéma n°15).

7.9 VERIFICATION DE LA ZONE D'ALIMENTATION

Lorsqu'un disjoncteur déclenche sur un court-circuit de la caténaire, il ne doit pas être réenclenché immédiatement, pour ne pas surcharger la caténaire et les installations de la sous-station en enclenchant sur un court-circuit. Il faut d'abord vérifier si le court-circuit existe encore. On applique pour cela la tension de service U_s sur la zone concernée à travers une résistance de mesure R_p .

Les valeurs de R_p et U_b étant constantes, le courant de vérification I_p dépend de la résistance résiduelle de la caténaire Z_s . D'après la loi d'Ohm, la résistance R_p et la chute de tension à ses bornes U_p sont proportionnelles à la résistance résiduelle Z_s et à sa chute de tension U_s . On peut donc utiliser au choix le courant de vérification I_p ou les tensions U_s ou U_p pour déterminer la valeur de la résistance résiduelle Z_s .



ENPA

INSTALLATIONS - AUXILIAIRES

DESSIN NO 15

La caténaire ne peut être raccordée à nouveau à la barre de distribution que si cette valeur dépasse un certain niveau. Dans le cas contraire, le court-circuit subsiste, et il faut attendre qu'il soit éliminé ou que la partie défectueuse soit débranchée.

7.10 PROTECTION DES TRANSFORMATEURS

Les transformateurs sont en danger en cas de surcharge de défaut interne (court-circuit entre enroulements) ou de défaut externe (court-circuit dans la distribution).

Les transformateurs sont équipés d'une protection différentielle et d'une protection Buchholz contre les défauts internes.

La protection différentielle contrôle le rapport entre le courant primaire et le courant secondaire en tenant du rapport de transformation. En cas de discordance entre les deux courants, la protection différentielle coupe instantanément le primaire et le secondaire du circuit.

La protection Buchholz surveille l'huile du transformateur si en cas de surchauffe locale dans le transformateur, l'huile circule trop rapidement, cette protection coupe immédiatement les circuits primaires et secondaires. En cas de léger dégagement gazeux, il n'est donné qu'une simple alarme.

Pour la protection contre les conséquences des défauts extérieurs, et des surcharges, on équipe les transformateurs d'un relais d'intensité temporisé. Son calibre est effectué pour une intensité double de l'intensité nominale avec un retard de 0,5 s. Cette protection se déclenchera également si un disjoncteur ne remplit pas son office et sert ainsi de protection de réserve.

IIX - VUE D'ENSEMBLE DES MODES D'INFLUENCE EN COURANT ALTERNATIF

8.1. GENERALITES

Par influence, il faut comprendre l'influence des circuits électrotechniques et des installations sur des autres circuits et installations, ainsi que sur des ensembles de conducteurs divers. L'influence électromagnétique se divise en 3 groupes suivant les différents modes de couplage.

En monophasé, tous les modes d'influence sont présents, car la caténaire monophasée utilise un conducteur en pleine terre comme retour de courant. Il faut en outre étudier en plus l'influence en exploitation normale celle qui se produit en cas de court-circuit.

8.2. INFLUENCE CAPACITIVE

La cause de l'influence capacitive est la tension dans la caténaire. Elle produit un champ électrique qui influence les circuits qui lui sont enchaînés. Il existe le rapport suivant entre la cause et l'effet.;

Tension à la caténaire → champ électrique de la caténaire → influence → tension induite dans le circuit influence.

En tenant compte des possibilités techniques, il existe différents moyens pour diminuer l'influence capacitive qui ne sont pas tous utilisables en pratique :

- mise en câble des circuits de télécommunications,
- augmentation de la distance entre la caténaire et les circuits de télécommunications,
- diminution de la hauteur des circuits de télécommunications,
- installation des fils de protection reliés à la terre à proximité des circuits de télécommunications ou entre ceux-ci et la caténaire.

8.3. INFLUENCE INDUCTIVE

La cause de l'influence inductive est le courant circulant dans la caténaire. Il produit un champ magnétique qui induit une tension dans les conducteurs voisins. Il existe le rapport suivant entre cause et effet :

courant dans la caténaire → champ magnétique du courant caténaire → induction → tension induite dans le circuit influencé.

En tenant compte des possibilités techniques, il existe différents moyens pour diminuer l'influence inductive :

- mise en câble des circuits de télécommunications,
- augmentation de la distance entre la caténaire et les circuits de télécommunications.

8.4. INFLUENCE OHMIQUE

La cause de l'influence ohmique sont les parties communes aux différents circuits et au retour du courant traction. Les circuits s'influencent mutuellement en raison des chutes de tension sur les parties de conducteurs communes. Il existe le rapport suivant entre la cause et l'effet :

courant caténaire ou retour par le rail → résistance du couplage → courant dans le circuit influencé.

8.5. SOLUTION PROPOSEE

La mise en câble des circuits de signalisation et de télécommunications comme remède contre l'influence de la caténaire est dictée par des raisons techniques, une plus grande sécurité d'exploitation et des frais d'entretien quasiment nuls.

IX - SERVICE AUTOMATIQUE DE LA SOUS-STATION

9.1. GENERALITES

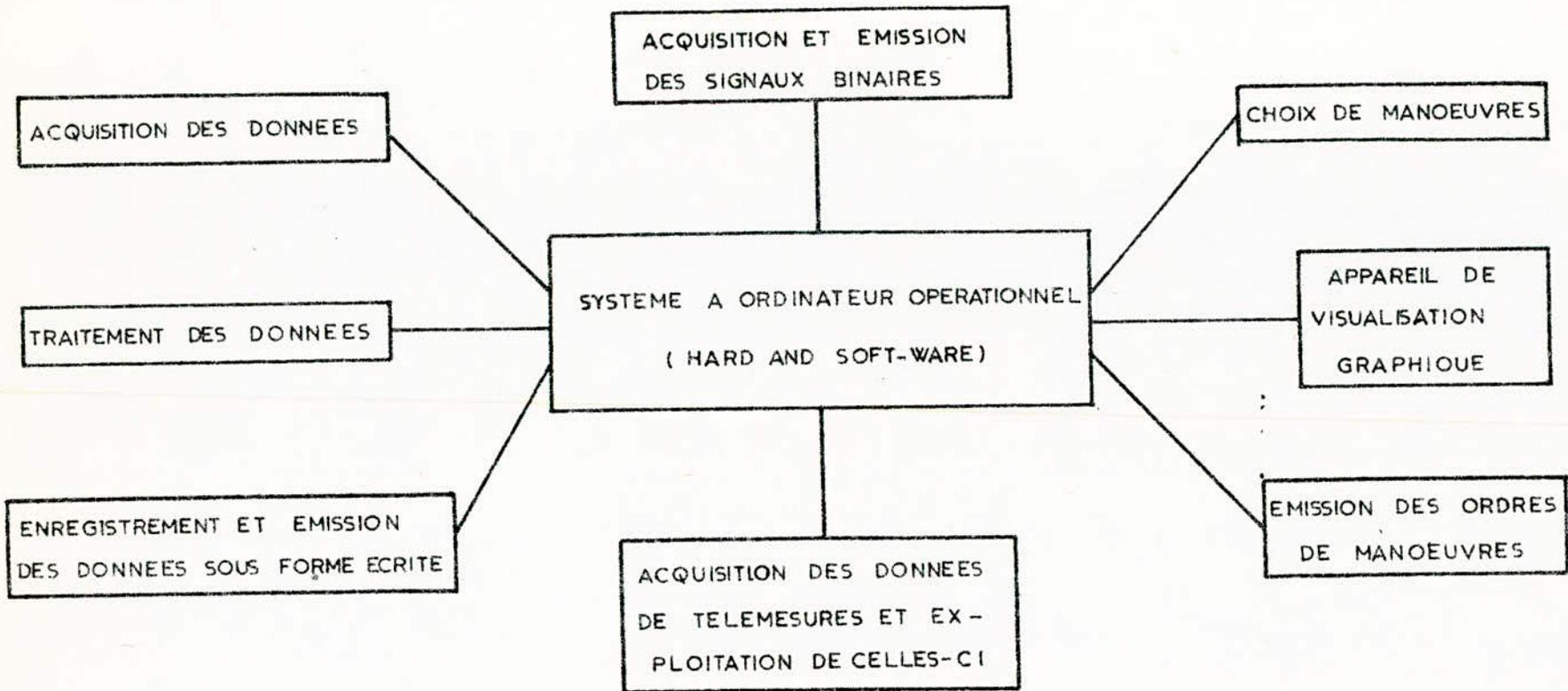
On part du principe qu'une sous-station servira de centre principal pour l'exploitation et que tous les sectionneurs et les disjoncteurs seront télécommandés depuis cette sous-station.

La commande centralisée des sous-stations (C.S.S.) pourra être installée dans la sous-station du CAROUBIER. Les postes télécommandés seront reliés au central par des circuits de télécommande. En considérant la tendance du développement de la technique de télécommande ainsi que le moment de la réalisation de ce projet et en tenant compte des facteurs économiques, on proposera une installation avec un ordinateur et tableau synoptique de télécommande.

Système composé d'un ordinateur et d'un tableau synoptique de télécommande

Dans le central sous-station (C.S.S.) on a un ordinateur opérationnel permettant les choix des manoeuvres à l'aide d'appareils de visualisation. Outre le choix des manoeuvres à commander, l'ordinateur se charge également de l'enregistrement et du traitement des données de mesure (aperçu des fonctions, voir schéma n° 16).

La conception des installations prévoit en fonctionnement normal le choix des manoeuvres à effectuer de l'ordinateur. Comme réserve de fonctionnement, la commande directe de celle-ci est effectuée par le personnel à l'aide du tableau synoptique de télécommande et/ou du tableau de commandes locales.



X - COMPARAISON ENTRE LES MODES DE TRACTION ET CONCLUSION

10.1. COMPARAISON ENTRE LES DEUX MODES DE TRACTION

1. Emplacement et distance entre sous-stations

La traction monophasée à fréquence industrielle autorise de grandes distances entre sous-stations (25 ÷ 40) km ce qui implique l'emplacement de celles-ci auprès des postes H.T. ou bien une connection directe au poste H.T.

Par contre en courant continu, les sous-stations sont plus rapprochées. Ce qui donne un grand nombre de sous-stations en courant continu et moins en courant alternatif.

Dans notre cas, c'est-à-dire pour la ligne Tafourah - Thénia on a 4 sous-stations à courant continu et 2 sous-stations à courant alternatif seulement.

2. Déséquilibre apporté au réseau SONELGAZ par le type de traction

Le prélèvement monophasé introduit un déséquilibre au réseau SONELGAZ. Par contre, il n'y en a pas pour le courant continu.

3. Comparaison des sous-stations

Les sous-stations à courant alternatif contiennent essentiellement des transformateurs monophasés en groupe SCOTT. Ces sous-stations sont plus simples donc probablement moins chères que les sous-stations à courant continu, qui comportent des groupes de conversion : transformateur-triphasé plus redresseur.

A N N E X E I

En ce qui nous concerne, on assume une consommation moyenne. Pour cela on s'est référé à la formule citée par le Professeur J. PODOSKI dans le manuel "ZASADY TRAKCJI ELEKTRYCZNES" page 393, pour la consommation unitaire.

Nous donnons un bref aperçu de cette formule :

$$Q_s = \frac{2,722}{\zeta_s \zeta_z} [W_0 + W_l + i_{sp} \pm i_0 + \frac{V_{jr} V_{max}}{100 K} + \frac{K}{2,54 L} (1 - \frac{W_h}{Ph}) (\frac{V_h}{10})^2 + \frac{\xi K}{2,54 L} (1 + \frac{W_r}{Pr}) (\frac{V_r}{10})^2] [Wh/T km]$$

où

ζ_s : rendement de la transmission

ζ_z : rendement des moteurs de traction

2,722 : 1 (tonne mètre) = 2,722 Wh

W_0 : résistance à l'avancement du train à vitesse $V = 0$ (kg/t)

W_e : résistance à l'avancement sur courbes (kg/T) moyenne pour la section

i_{sp} : o/oo = $\frac{1}{S} \sum_1^n (i_x - W_x) \Delta S_x$:

S - longueur entre arrêts (m)

ΔS_x : section x sur lesquelles l'inclinaison

i_x : est telle qu'il faut freiner le train

W_x : résistance à l'avancement sur la section X.

Mais

$$K \left(1 + \frac{W_r}{P_r} \right) \approx 1,1 \text{ pour rames automotrices}$$

$$W_0 \approx 1,5 \div 2 \text{ kg/T}$$

$$W_l \approx 0 \text{ pour lignes magistrales}$$

$$V_r \approx 40 \text{ km/h pour rames grande vitesse : } V_r \approx 50 \text{ km/h}$$

$$V_h \approx 3/4 V_{\max} \text{ on l'assume } 60 \text{ km/h}$$

$$\xi \approx 1/2$$

$$\zeta_s \approx 0,97$$

$$\zeta_z \approx 0,88$$

Alors on aura l'approximation suivante :

$$q_s \approx 3,2 \left[2 + i_{sp} \pm i_0 + \frac{V_{sr} V_{\max}}{100 K} + \frac{0,395}{L} \left(\frac{V_h}{10} \right)^2 + \frac{0,197}{L} k \right]$$

$$\left(1 + \frac{W_h}{P_h} \right) \left(\frac{V_h}{10} \right)^2]$$

$$q_s \approx 3,2 \left[2 + \frac{V_{sr} \times 120}{100 \cdot K} + \frac{0,395}{L} \left(\frac{60}{10} \right)^2 + \frac{0,197}{L} \times 1,1 \right]$$

$$\left(1 + \frac{3}{30} \right) \left(\frac{50}{10} \right)^2]$$

Pour calculer q_s , il faut connaître la vitesse moyenne et la longueur L. En courant continu, on a :

$$q_s \approx 3,2 \left[2 + 0,04 V_{sr} + \frac{14,22}{L} + \frac{5,96}{L} \right]$$

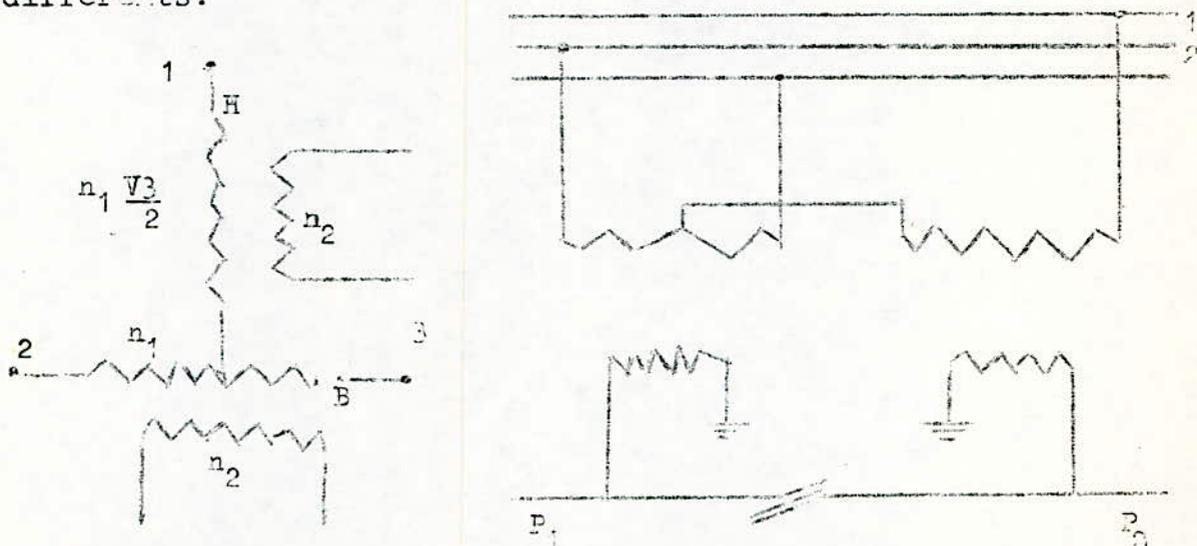
En courant alternatif, l'équation est légèrement différente :

$$q_s \approx 3,2 \left[2 + 0,04 V_{sr} + \frac{14,22}{L} \right]$$

ANNEXE II

MONTAGE SCOTT

Un groupe SCOTT comporte figure 1 deux transformateurs monophasés B et H dont les circuits magnétiques et les enroulements secondaires sont identiques ; les enroulements primaires sont différents.



Le transformateur B, dit "élément de base" est branché entre 2 phases du réseau triphasé.

Le transformateur H dit "élément hauteur" a son enroulement primaire branché entre la 3e phase du réseau et le point milieu de l'enroulement primaire du transformateur B.

Si n_1 est le nombre de spires de l'enroulement primaire B, on donnera à l'enroulement primaire H un nombre de spires égal à $\frac{\sqrt{3}}{2} n_1$, grâce à quoi les tensions secondaires de B et H seront égales en grandeur (mais déphasées de $\pi/2$).

Nous allons montrer que si les charges P_1 et P_2 (amont et aval) sont égales les courants I_1, I_2, I_3 appelés au primaire constituent un système triphasé rigoureusement équilibré.

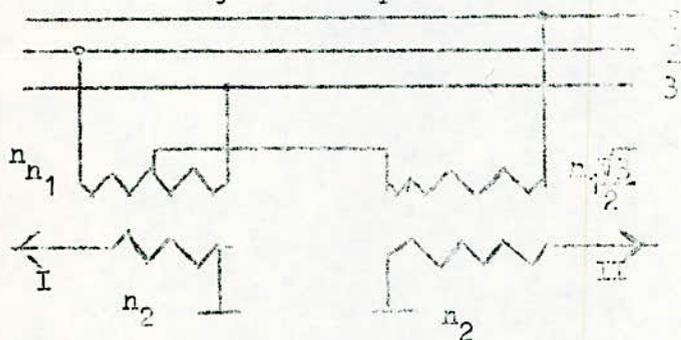
On peut se représenter l'état de fonctionnement correspondant aux charges P_1 et P_2 comme la superposition des 2 états suivants

1er état : le circuit secondaire 1 absorbe une intensité J ;
le circuit 2 est à vide.

2e état : le circuit secondaire 2 absorbe une intensité J
tandis que le circuit 1 est à vide.

Les courants I_1, I_2, I_3 absorbés sur les fils 1, 2, 3 dans chacun de ces états sont donnés sur le tableau de la figure ainsi que la somme géométrique des états 1 et 2.

On voit finalement que les 3 vecteurs I_1, I_2, I_3 sont égaux en grandeur et progressivement déphasés de 120° . Ils forment un système équilibré.



état 1 / I absorbe J
II absorbe 0

état 2 / I absorbe 0
II absorbe J

	Intensité fil 1	Intensité fil 2	Intensité fil 3
1er état	↑ $J \frac{n_2}{n_1}$	→ $J \frac{n_2}{n_1}$	← $J \frac{n_2}{n_1}$
2e état	↑ $J \frac{n_2}{n_1}$	↓ $J \frac{n_2}{n_1}$	↓ $J \frac{n_2}{n_1}$
Total	↑ I_1	↘ 120° I_2	↙ 120° I_3

Si les charges P_1 et P_2 sont inégales, on peut admettre que l'effet sera assimilable à celui d'une ponction monophasée pure égale seulement à $P_1 - P_2$.

Si au contraire, on s'était contenté de brancher un simple transformateur monophasé, la ponction aurait été $P_1 + P_2$ sur une seule phase.

Une solution intermédiaire, moins parfaite que le montage SCOTT, consisterait à brancher 2 transformateurs "en V".

La ponction monophasée équivalente est dans ce cas de l'ordre de grandeur de la plus grande des deux puissances P_1 et P_2 .

Notons qu'on retrouve encore dans ce montage 2 tensions secondaires non en phase, donc l'obligation d'une section de séparation au droit de la sous-station.

Il existe un autre montage, dit montage LEBLANC qui permet de réduire le déséquilibre comme le SCOTT. Pour diverses raisons, il n'est pas utilisé en traction.

- BIBLIOGRAPHIE

J. PODOSKI..... Zasady trakcji elektrycznej

F. NOUVION Les techniques de l'électricité
ferroviaire (2 tomes texte et figures)

M. GARREAU Cours de traction électrique



